



**Universidade de
Aveiro
2011**

Departamento de Física

**Tiago Filipe Costa
Rodrigues**

**Ciclones no Oceano Atlântico Norte – Clima actual e
cenário futuro.**



**Universidade de
Aveiro
2011**

Departamento de Física

**Tiago Filipe Costa
Rodrigues**

**Ciclones no Oceano Atlântico Norte – Clima actual e
cenário futuro.**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Meteorologia e Oceanografia Física, realizada sob a orientação científica de Alfredo Rocha, Professor Associado com Agregação do Departamento de Física da Universidade de Aveiro.

o júri
presidente

Professor Doutor José Manuel Henriques Castanheira
Professor auxiliar da Universidade de Aveiro

Professor Doutor Alfredo Moreira Caseiro Rocha
Professor Associado com Agregação da Universidade de Aveiro

Doutora Ana Cristina Caldeira Da Silva Gouveia Carvalho
Investigadora Auxiliar - CENSE, Departamento de Ciências e Engenharia do Ambiente na
Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa

agradecimentos

Agradeço ao professor Doutor Alfredo Rocha pela orientação, disponibilidade, sugestões e incentivo demonstrados na realização desta dissertação.

Este trabalho não teria sido possível sem a disponibilidade demonstrada pelo grupo de ciências atmosféricas e oceânicas da Universidade de Melbourne para a cedência do software utilizado nesta dissertação e em particular, ao Doutor Kevin Keay por toda a disponibilidade e empenho demonstrados na resolução de alguns problemas técnicos inerentes ao referido software.

Agradeço, também, à Marta Teixeira por facultar os resultados por ela obtidos no âmbito do seu projecto final de Licenciatura.

Agradeço, ainda, a ajuda prestada pelo Grupo de Meteorologia e Climatologia da Universidade de Aveiro, e, neste aspecto, em particular, ao Carlos F. Marques, pela sua ajuda indispensável.

Finalmente, um agradecimento especial à minha namorada, Linda Moniz, pelos seus conselhos e auxílio prestado ao longo deste ano.

palavras-chave

Ciclones, tempestades, Atlântico norte, Cyclone Tracking, alterações climáticas, ERA40, NCEP I, ECHAM5, CCSM3.

resumo

Este trabalho estuda a actividade ciclónica verificada na região do Atlântico Norte no clima actual e num cenário climático futuro. Para tal aplicou-se o algoritmo de detecção/*tracking* desenvolvido pela Universidade de Melbourne a quatro conjuntos de dados diferentes: reanálises ERA40 e NCEP I (clima actual), e modelos climáticos ECHAM5 e CCSM3 (clima actual e futuro). O clima actual refere-se ao período entre 1971 e 2000, e o cenário climático futuro refere-se ao período 2071-2100. Para o clima futuro é considerado o cenário A2 do quarto relatório do IPCC.

O estudo recai sobre uma região centrada no Atlântico norte sendo as fronteiras do domínio considerado definidas pelos limites: 85W - 15E, 25N - 70N. São apresentadas climatologias de diversas características dos ciclones, bem como as tendências observadas nos dois climas referidos. Faz-se, também, uma comparação entre as reanálises NCEP I e ERA40.

Através do estudo realizado para o clima actual foi possível verificar que grande parte da actividade ciclónica centra-se nas latitudes mais elevadas do domínio. É aqui que se registam máximos de intensidade, profundidade, número de sistemas, e mínimos de pressão central. Este período apresenta, também, uma tendência para o aumento da intensidade dos ciclones próximo da Península Escandinávia e norte do Canada, verificando-se um aumento do laplaciano médio da pressão em aproximadamente 0.006 e 0.004 hPa °lat⁻² ano⁻¹ respectivamente.

Apesar do elevado grau de concordância verificado entre as reanálises NCEP I e ERA40, verificou-se que as NCEP I tendem a produzir mais sistemas nas latitudes elevadas e menos nas latitudes mais baixas durante o inverno. Os sistemas produzidos pelas reanálises NCEP I tendem, ainda, a ser de maior dimensão e menos intensos.

Os modelos ECHAM5 e CCSM3 reproduzem correctamente as climatologias do período 1971-2000, possibilitando o seu uso para o estudo de um clima futuro. Porém, os resultados obtidos para o clima futuro não indicaram alterações substanciais ao verificado no período 1971-2000, com excepção para uma ligeira redução da intensidade dos ciclones, acompanhado de um deslocar para norte de aproximadamente 3° de latitude do máximo da média zonal de ciclones, no período de inverno.

keywords

Cyclones, storms, north Atlântic, Cyclone Tracking, climate change, ERA40, NCEP I, ECHAM5, CCSM3.

abstract

The goal of this work is to study the cyclonic activity in a region centered in the North Atlantic basin to the current and future climates. This has been compiled by applying the algorithm of cyclone detection/tracking developed by the University of Melbourne to four different datasets: ERA40 and NCEP I reanalysis (current climate) and two climate models: ECHAM5 and CCSM3 (current and future climate). The current climate spans the period between 1971 and 2000, while for the future climate it's considered the period between 2071 and 2100. For the future climate the scenario A2 of the fourth IPCC report is considered.

The study is performed for a region centered in the North Atlantic basin in an area covered by those limits: 85W - 15E, 25N - 70N. Climatology and trends are presented for various characteristics of cyclones in these two climates. An comparison between NCEP I and ERA40 reanalysis it's done as well.

The results for the current climate shows that much of the cyclonic activity is centered in the higher latitudes of the domain. Here we have the maximum intensity, depth, number of systems, and minimum central pressure. An increased intensity of cyclones could be observed along the Peninsula Scandinavia and northern of Canada by the increase of the mean laplacian of pressure about 0.006 and 0.004 $^{\circ}$ hPa lat $^{-2}$ yr $^{-1}$ respectively.

Although the high degree of agreement found between the NCEP I and ERA40 reanalysis, it was found that the NCEP I tend to produce more systems in the higher latitudes and less in lower latitudes during the winter. The systems produced by the NCEP I reanalysis tend also to be larger and less intense.

The ECHAM5 and CCSM3 models were capable of reproducing the climatology of the period 1971-2000, allowing its use to study a future climate. However, no substantial changes were found in the cyclonic activity of the future climate, by comparing with present climate. Nevertheless a slight reduction in the intensity of cyclones, accompanied by northward move during the winter in about 3 $^{\circ}$ latitude of maximum zonal mean of number of cyclones could be observed.

Índice:

1. Introdução.....	1
2. Estado da Arte.....	2
3. Métodos e Dados.....	3
3.1. Esquema de <i>Tracking</i>	3
3.2. Variáveis.....	4
3.3. Dados.....	6
3.3.1. Reanálises ERA40.....	7
3.3.2. Reanálises NCEP I.....	7
3.3.3. Modelo ECHAM5.....	7
3.3.4. Modelo CCSM3.....	7
3.3.5. Cenário Climático A2.....	8
3.4. Domínio de Estudo e Tratamento estatístico.....	8
4. Resultados/Discussão.....	9
4.1. Clima actual.....	9
4.1.1. Média.....	9
4.1.2. Desvio Padrão.....	19
4.1.3. Tendências.....	20
4.1.4. Conclusões.....	31
4.2. Clima futuro.....	33
4.2.1. Média.....	32
4.2.2. Desvio Padrão.....	38
4.2.3. Tendências.....	39
4.2.4. Conclusões.....	44
4.3. Perfis Meridionais.....	45
5. Conclusões.....	47
6. Referências.....	48
Anexo.....	51

Lista de Figuras

Figura 1: Esquema ilustrativo das condições ideais (à superfície e em altitude) para o desenvolvimento de uma tempestade extra tropical (Ahrens, 2000).....	1
Figura 2: Corte do capo da pressão ($p(x)$) e respectivas derivadas (p_x e p_{xx}).....	3
Figura 3: Esquema representativo do cálculo da medida do raio (Lim e Simmonds,2007).....	4
Figura 4: Esquema representativo do cálculo da profundidade (Lim e Simmonds,2007).....	5
Figura 5: Domínio de estudo. Limitação zonal: 85W - 15E; Limitação meridional: 25N 70N	8
Figura 6: Ciclogénese no Inverno (esquerda) e Verão (direita) - Reanálises ERA40.....	10
Figura 7: Ciclogénese no Inverno (esquerda) e Verão (direita) - Reanálises NCEP I	10
Figura 8: Ciclogénese no Inverno (esquerda) e Verão (direita) - Modelo ECHAM5.....	10
Figura 9: Ciclogénese no Inverno (esquerda) e Verão (direita) - Modelo CCSM3.....	10
Figura10: Ciclólises no Inverno (esquerda) e Verão (direita) - Reanálises ERA40.....	11
Figura 11: Ciclólises no Inverno (esquerda) e Verão (direita) - Reanálises NCEP I.....	11
Figura 12: Ciclólises no Inverno (esquerda) e Verão (direita) - Modelo ECHAM5.....	11
Figura 13: Ciclólises no Inverno (esquerda) e Verão (direita) - Modelo CCSM3.	11
Figura 14: Número total de tempestades no Inverno (esquerda) e Verão (direita) - Reanálises ERA40	12
Figura 15: Número total de tempestades no Inverno (esquerda) e Verão (direita) - Reanálises NCEP I.....	12
Figura 16: Número total de tempestades no Inverno (esquerda) e Verão (direita) - Modelo ECHAM5.....	12
Figura 17: Número total de tempestades no Inverno (esquerda) e Verão (direita) - Modelo CCSM3.....	13
Figura 18: Densidade de sistemas no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Reanálises ERA40.....	13
Figura 19: Densidade de sistemas no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Reanálises NCEP I.....	13
Figura 20: Densidade de sistemas no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Modelo ECHAM5.....	14
Figura 21: Densidade de sistemas no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Modelo CCSM3.....	14
Figura 22: Profundidade (hPa) no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Reanálises ERA40.....	14
Figura 23: Profundidade (hPa) no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Reanálises NCEP I.....	15
Figura 24: Profundidade (hPa) no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Modelo ECHAM5.....	15
Figura 25: Profundidade (hPa) no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Modelo CCSM3.....	15
Figura 26: Pressão no centro no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Reanálises ERA40.....	16
Figura 27: Pressão no centro no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Reanálises NCEP I.....	16
Figura 28: Pressão no centro no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Modelo ECHAM5.....	16
Figura 29: Pressão no centro no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Modelo CCSM3.....	16
Figura 30: Raio no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Reanálises ERA40.....	17
Figura 31: Raio no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Reanálises NCEP I.....	17
Figura 32: Raio no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Modelo ECHAM5.....	17
Figura 33: Raio no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Modelo CCSM3.....	17
Figura 34: Intensidade no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Reanálises ERA40.....	18
Figura 35: Intensidade no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Reanálises NCEP I	18
Figura 36: Intensidade no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Modelo ECHAM5	18
Figura 37: Intensidade no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Modelo CCSM3	19
Figura 38: Tendência da ciclogénese no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Reanálises ERA40. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.....	20
Figura 39: Tendência da ciclogénese no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Reanálises NCEP I Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.....	20
Figura 40: Tendência da ciclogénese no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Modelo ECHAM5. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.	21
Figura 41: Tendência da ciclogénese no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Modelo CCSM3. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.....	21

Figura 42: Tendência da ciclólise no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Reanálises ERA40. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.....	21
Figura 43: Tendência da ciclólise no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Reanálises NCEP I. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.....	22
Figura 44: Tendência da ciclólise no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Modelo ECHAM5.....	22
Figura 45: Tendência da ciclólise no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Modelo CCSM3. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.	22
Figura 46: Tendência do número total de tempestades no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Reanálises ERA40. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.	23
Figura 47: Tendência do número total de tempestades no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Reanálises NCEP I. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.	23
Figura 48: Tendência do número total de tempestades no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Modelo ECHAM5. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%	23
Figura 49: Tendência do número total de tempestades no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Modelo CCSM3. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.....	23
Figura 50: Tendência da densidade de sistemas no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Reanálises ERA40. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.....	24
Figura 51: Tendência da densidade de sistemas no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Reanálises NCEP I. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.....	24
Figura 52: Tendência da densidade de sistemas no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Modelo ECHAM5. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.....	24
Figura 53: Tendência da densidade de sistemas no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Modelo CCSM3. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.....	25
Figura 54: Tendência da profundidade no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Reanálises ERA40. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.....	25
Figura 55: Tendência da profundidade no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Reanálises NCEP I. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.....	25
Figura 56: Tendência da profundidade no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Modelo ECHAM5. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.....	26
Figura 57: Tendência da profundidade no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Modelo CCSM3. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.....	26
Figura 58: Tendência da pressão no centro no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Reanálises ERA40. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.....	27
Figura 59: Tendência da pressão no centro no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Reanálises NCEP I.	

Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.....	27
Figura 60: Tendência da pressão no centro no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Modelo ECHAM5. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.....	27
Figura 61: Tendência da pressão no centro no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Modelo CCSM3. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.....	28
Figura 62: Tendência do raio no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Reanálises ERA40. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.....	28
Figura 63: Tendência do raio no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Reanálises NCEP I. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.....	28
Figura 64: Tendência do raio no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Modelo ECHAM5. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.....	29
Figura 65: Tendência do raio no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Modelo CCSM3. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.....	29
Figura 66: Tendência da intensidade no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Reanálises ERA40. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.....	29
Figura 67: Tendência da intensidade no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Reanálises NCEP I. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.....	30
Figura 68: Tendência da intensidade no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Modelo ECHAM5. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.....	30
Figura 69: Tendência da intensidade no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Modelo CCSM3. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.....	30
Figura 70: Ciclogénese no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Modelo ECHAM5.....	33
Figura 71: Ciclogénese no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Modelo CCSM3.....	33
Figura 72: Ciclólise no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Modelo ECHAM5.....	34
Figura 73: Ciclólise no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Modelo CCSM3.....	34
Figura 74: Número total de tempestades no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Modelo ECHAM5.....	34
Figura 75: Número total de tempestades no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Modelo ECHAM5.....	34
Figura 76: Densidade de sistemas no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Modelo ECHAM5.....	35
Figura 77: Densidade de sistemas no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Modelo ECHAM5.....	35
Figura 78: Profundidade no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Modelo ECHAM5.....	35
Figura 79: Profundidade no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Modelo CCSM3.....	36
Figura 80: Pressão no centro no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Modelo ECHAM5.....	36
Figura 81: Pressão no centro no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Modelo CCSM3.....	36
Figura 82: Raio no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Modelo ECHAM5.....	37
Figura 83: Raio no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Modelo CCSM3.....	37
Figura 84: Intensidade no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Modelo ECHAM5.....	37

Figura 85: Intensidade no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Modelo CCSM3.....	38
Figura 86: Ciclogénese no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Modelo ECHAM5. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.....	39
Figura 87: Ciclogénese no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Modelo CCSM3. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.....	39
Figura 88: Ciclólise no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Modelo ECHAM5. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.....	39
Figura 89: Ciclólise no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Modelo CCSM3. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.....	40
Figura 90: Número total de tempestades no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Modelo ECHAM5. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.....	40
Figura 91: Número total de tempestades no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Modelo CCSM3. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.....	40
Figura 92: Densidade de sistemas no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Modelo ECHAM5. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.....	41
Figura 93: Densidade de sistemas no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Modelo CCSM3. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.....	41
Figura 94: Profundidade no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Modelo ECHAM5. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.....	41
Figura 95: Profundidade no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Modelo CCSM3. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.....	42
Figura 96: Pressão no centro no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Modelo ECHAM5. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.....	42
Figura 97: Pressão no centro no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Modelo CCSM3. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.....	42
Figura 98: Raio no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Modelo ECHAM5. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.....	43
Figura 99: Raio no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Modelo ECHAM5. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.....	43
Figura 100: Tendência da Intensidade no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Modelo ECHAM5. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.....	44
Figura 101: Tendência da Intensidade no Inverno (esquerda) e no Verão (direita) - Modelo CCSM3. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.....	44
Figura 102: Perfis meridionais do número total de tempestades médio no inverno (esquerda) e verão (direita).....	46

Figura 103: Perfis meridionais do raio médio no inverno (esquerda) e verão (direita).....	46
Figura 104: Perfis meridionais da intensidade no inverno (esquerda) e verão (direita).....	47
Fig.1-A – Desvio padrão do número total de tempestades no inverno (esquerda) e verão (direita). Período 1971 – 2000. Reanálises ERA40.....	51
Fig.2-A – Desvio padrão do número total de tempestades no inverno (esquerda) e verão (direita). Período 1971 – 2000. Reanálises NCEP I.....	51
Fig.3-A – Desvio padrão do número total de tempestades no inverno (esquerda) e verão (direita). Período 1971 – 2000. Modelo ECHAM5.....	51
Fig.4-A – Desvio padrão do número total de tempestades no inverno (esquerda) e verão (direita). Período 1971 – 2000. Modelo CCSM3.....	51
Fig.5-A – Desvio padrão do raio ($^{\circ}$ lat) no inverno (esquerda) e verão (direita). Período 1971 – 2000. Reanálises ERA40.....	52
Fig.6-A – Desvio padrão do raio ($^{\circ}$ lat) no inverno (esquerda) e verão (direita). Período 1971 – 2000. Reanálises NCEP I.....	52
Fig.7-A – Desvio padrão do raio ($^{\circ}$ lat) no inverno (esquerda) e verão (direita). Período 1971 – 2000. Modelo ECHAM5.....	52
Fig.8-A – Desvio padrão do raio ($^{\circ}$ lat) no inverno (esquerda) e verão (direita). Período 1971 – 2000. Modelo CCSM3.....	52
Fig.9-A – Desvio padrão da intensidade ($\text{hPa } (^{\circ} \text{ lat})^{-2}$) no inverno (esquerda) e verão (direita). Período 1971 – 2000. Reanálises ERA40.....	53
Fig.10-A – Desvio padrão da intensidade ($\text{hPa } (^{\circ} \text{ lat})^{-2}$) no inverno (esquerda) e verão (direita). Período 1971 – 2000. Reanálises NCEP I.....	53
Fig.11-A – Desvio padrão da intensidade ($\text{hPa } (^{\circ} \text{ lat})^{-2}$) no inverno (esquerda) e verão (direita). Período 1971 – 2000. Reanálises Modelo ECHAM5.....	53
Fig.12-A – Desvio padrão da intensidade ($\text{hPa } (^{\circ} \text{ lat})^{-2}$) no inverno (esquerda) e verão (direita). Período 1971 – 2000. Modelo CCSM3.....	53
Fig.13-A – Desvio padrão do número total de tempestades no inverno (esquerda) e verão (direita). Período 2071 – 2100. Modelo ECHAM5.....	54
Fig.14-A – Desvio padrão do número total de tempestades no inverno (esquerda) e verão (direita). Período 2071 – 2100. Modelo CCSM3.....	54
Fig.15-A – Desvio padrão do raio ($^{\circ}$ lat) no inverno (esquerda) e verão (direita). Período 2071 – 2100. Modelo ECHAM5.....	54
Fig.16-A – Desvio padrão do raio ($^{\circ}$ lat) no inverno (esquerda) e verão (direita). Período 2071 – 2100. Modelo CCSM3.....	54
Fig.17-A – Desvio padrão da intensidade ($\text{hPa } (^{\circ} \text{ lat})^{-2}$) no inverno (esquerda) e verão (direita). Período 1971 – 2000. Reanálises Modelo ECHAM5.....	55
Fig.18-A – Desvio padrão da intensidade ($\text{hPa } (^{\circ} \text{ lat})^{-2}$) no inverno (esquerda) e verão (direita). Período 1971 – 2000. Reanálises Modelo CCSM3.....	55
Fig.19-A – Tendência da intensidade ($\text{hPa } (^{\circ} \text{ lat})^{-2} \text{ ano}^{-1}$) no Outono durante o período 1971 -2000. Reanálises ERA40 (esquerda) e Reanálises NCEP I (direita). Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.....	55

Lista de símbolos:

D – período temporal em estudo;

d – número total de distancias.

DP – Profundidade;

DSLQ – Grau quadrado de latitude;

FG – ciclogénese;

INT – intensidade;

N – número de tempestades que passa em cada ponto da grelha;

nd – número de medidas da distância entre o centro de um ciclone e os locais na margem do mesmo onde $\nabla^2(p) = 0$.

Nf – Número de ciclólises;

Ni – Numero de ciclogéneses em cada ponto da grelha;

NL - corresponde ao número de elementos da série L;

NM - número de elementos da série M;

$p(x)$ – pressão em função de x;

p_x – primeira derivada de $p(x)$;

p_{xx} - segunda derivada de $p(x)$;

\overline{PC} – Pressão central média;

PC(N) – Pressão no centro de um ciclone;

r_i – distancia entre o centro do ciclone e um ponto na sua margem onde $\nabla^2(p) = 0$.

RO – Raio ;

SD – Densidade de sistemas;

SL - desvio padrão da série L;

SM - desvio padrão da série M

SST – Temperatura da superfície do oceano

t – distribuição t-student;

TTD – Número total de tempestades;

XL – Valor médio pré definido;

XM – valor médio da série;

$\nabla^2(p)$ – laplaciano do campo da pressão;

1. Introdução:

A distribuição dos sistemas de altas e baixas pressões está dependente de diversos factores, tais como o posicionamento de massas de terra/água, orografia, temperatura da superfície do oceano (SST) e respectivos gradientes térmicos. Assim, existem locais mais propensos à formação de tempestades (ciclogénese), nomeadamente, zonas de elevados gradientes térmicos, lados *lee* das montanhas ou bacias oceânicas com elevadas SST. O tempo de vida de uma tempestade comporta várias etapas, desde a sua formação (ciclogénese) (geralmente rápida), crescimento e posterior dissipação (ciclólise). O espaço temporal em que todo este processo se desenrola varia tipicamente entre alguns dias a uma semana, sendo este sempre muito dependente das condições que deram origem à tempestade, bem como, em grande parte, pelas condições verificadas nos altos níveis da atmosfera. As condições na alta troposfera são decisivas para a formação de uma tempestade, sobretudo o posicionamento das zonas de vento mais intensas, definidas como correntes de jacto (figura 1) (Ahrens, 2000).

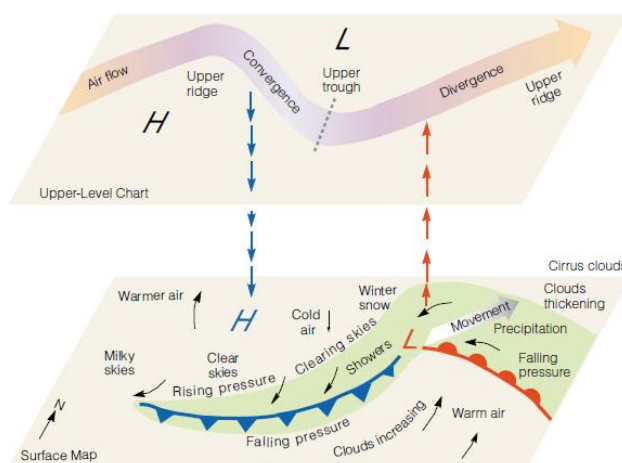


Fig.1 Esquema ilustrativo das condições ideais (à superfície e em altitude) para o desenvolvimento de uma tempestade extra tropical (Ahrens, 2000).

Como mostra a figura 1, as zonas divergentes do jacto favorecem a subida de ar quente que se encontra à superfície, enquanto as zonas convergentes do jacto favorecem a descida do ar frio que se encontra em altitude. Enquanto a convergência nos altos níveis for superior à convergência à superfície a pressão no centro da tempestade tenderá a diminuir rapidamente, levando à sua consequente intensificação. É este mecanismo que permite à tempestade converter energia potencial em energia cinética. Note-se que nesta fase de crescimento da tempestade os sistemas sinópticos à superfície e em altitude estão desfasados, isto é, o vale depressionário em altitude encontra-se a oeste do vale à superfície, o mesmo acontecendo com a crista anticiclónica. À medida que este apoio dos níveis elevados deixa de se verificar, a tempestade à superfície tende a enfraquecer gradualmente, acabando por se dissipar (Ahrens, 2000; Holton, 2004).

Diga-se, ainda, que as tempestades têm um papel determinante na circulação geral da atmosfera, para manter os balanços atmosféricos de energia, momento, vapor de água, redistribuindo-os por todo o globo (Holton, 2004).

Nas latitudes médias o estado do tempo é em grande parte determinado pela passagem de sistemas sinópticos de larga escala. A passagem de sistemas depressionários (ciclones), normalmente associados a mau tempo, é de grande importância, dado o seu potencial para poder causar danos. Como tal, é de vital importância estudar e compreender as características intrínsecas à actividade ciclónica, bem como verificar eventuais alterações da mesma. Assim, o grande objectivo deste trabalho centra-se em produzir climatologias e eventuais tendências de diversos parâmetros que caracterizem essa mesma actividade na região do Atlântico norte no clima actual (1971-2000) e num clima futuro (2071-2100). Para tal será aplicado o algoritmo de detecção e *tracking* desenvolvido por Murray e Simmonds (1991), a dados

de pressão ao nível médio do mar, simulados por dois modelos climáticos (ECHAM5¹ e CCSM3²). De forma a validar os dados destes modelos, aplicou-se primeiramente o algoritmo a dados de reanálises (NCEP I³ e ERA40⁴).

2. Estado da arte:

Desde há muito que se desenvolvem técnicas para a detecção/*tracking* e estudo de tempestades. Inicialmente estes estudos foram baseados em técnicas manuais de detecção/*tracking* apoiando-se em cartas sinópticas (van Bebber, 1891). Contudo, este trabalho exige muito tempo, obrigando à limitação do espaço temporal em estudo e ficando, também, sujeito à subjectividade e experiência do meteorologista. Com o surgir dos computadores e aumento da sua capacidade, uma série de esquemas automáticos e semiautomáticos foram desenvolvidos com o objectivo de fazer este trabalho a partir de campos digitais de variáveis meteorológicas. Um primeiro esquema foi utilizado para o hemisfério sul por Rice (1982). Com o avançar dos anos esquemas mais sofisticados foram introduzidos: ex. Lambert 1988; Le Treut and Kalnay 1990; Murray and Simmonds 1991; Hodges 1994, 1995; Serreze 1995; Haak and Ulbrich 1996; Blender et al. 1997; Sinclair 1994, 1995, 1997; Simmonds et al. 1999; Lionello et al. 2002; Wernli and Schwerz 2006. O surgir de todas estas técnicas de detecção/*tracking* trouxe consigo um grande aumento das publicações sobre este tema.

Inicialmente vários autores tomaram a pressão mínima no centro do ciclone como uma medida da intensidade do mesmo. Porém, esta medida está dependente do escoamento médio associado a cada região, sendo este facto visto como um grande inconveniente pela comunidade científica (Hoskins and Hodges, 2002). Assim, foram criadas medidas alternativas para o estudo da intensidade de cada tempestade. Blender et al. (1997) e Raible et al. (2007) utilizaram o gradiente médio da altura de geopotencial entre o centro da tempestade e os pontos posicionados a um raio de 1000 km de distância, enquanto Murray e Simmonds (1991) utilizaram o laplaciano da pressão num determinado raio definido como o raio da tempestade.

A região mais a norte do oceano Atlântico é uma das zonas de maior actividade ciclónica do hemisfério norte, apresentando a região do mediterrâneo um máximo secundário (Pinto et al., 2005). Tempestades com potencial para causar maiores danos tendem a ocorrer nos mares mais a norte, afectando sobretudo as regiões da América do Norte e o noroeste da Europa (Hanson et al., 2004; Pinto et al., 2005). As zonas de maior propensão para ocorrerem ciclogéneses tendem a situar-se junto de grandes cadeias montanhosas (Hoskins and Hodges, 2002; Pinto et al., 2005).

Alguns estudos já realizados centram-se também em comparar vários conjuntos de dados de reanálises. Hanson et al. (2004) mostra que o número de ciclones encontrados em reanálises ERA40 tende a ser superior ao número de ciclones encontrados nas reanálises NCEP. Raible et al. (2008) mostra também que as intensidades obtidas com dados ERA40 são superiores às obtidas com dados NCEP. Trigo (2006) e Löptien et al. (2008) referem, no entanto, que estas diferenças são superiores durante o período de verão. Trigo (2006) avança que uma das razões para estas discrepâncias pode estar relacionada com a resolução das diferentes reanálises. Porém, refere ainda, que só este facto não explica por si só as diferenças, referindo que a dinâmica dos modelos, bem como as parametrizações utilizadas ajudam também a explicar as diferenças. Note-se, no entanto, que estes dois últimos factores não são independentes do primeiro.

Ao longo dos últimos anos a comunidade científica tem procurado verificar que mudanças existiram na actividade ciclónica. Gulev et al. (2001) fez uma análise para o período 1958-1999, verificando uma tendência negativa no número de ocorrências de tempestades. O mesmo resultado pode ser encontrado em Raible et al. (2008). Por seu turno, Trigo (2006) avança no seu estudo para o hemisfério norte que existe uma tendência negativa para a ocorrência de ciclones na Europa central, contudo, um aumento na ocorrência dos mesmos pode ser verificada na Europa de norte. Existe, no entanto, um resultado que tem sido confirmado por vários autores, referindo que existe um deslocamento para norte da

¹ European Center Hamburg model

² Community Climate System Model

³ National Centers for Environmental Prediction

⁴ European Research Area

*storm track*⁵ (Wang et al. 2006; Trigo 2006). Wang et al (2006) refere, ainda, que esta tendência é mais visível em reanálises NCEP por comparação com ERA40.

Em termos de intensidade média das tempestades Wang et al (2006) e Gulev et al. (2001) referem um aumento significativo nas altas latitudes do hemisfério norte, especialmente visível no período de inverno.

Por fim, vários estudos realizados com dados de modelos climáticos globais evidenciam algumas alterações da actividade ciclónica. Embora estes resultados estejam algo dependentes dos cenários futuros utilizados, bem como dos próprios modelos, vários resultados comuns a alguns estudos têm sido verificados. Um desses resultados mostra um aumento na ocorrência de eventos extremos durante o inverno (em especial no nordeste Europeu), bem como uma ligeira redução do número de tempestades nos dois hemisférios (Lambert and Fyfe, 2006; Pinto et al., 2007; Pinto et al., 2008). Pinto et al. nos seus trabalhos publicados em 2007 e 2008 utilizou o conjunto simulações ECHAM5/MPI-OM1 GCM, para estimar mudanças na actividade ciclónica durante século XXI na Europa. É referido um aumento da potencialidade dos ciclones para causar danos em toda a região europeia verificando-se, também, um aumento da intensidade dos ciclones mais extremos sobre as Ilhas Britânicas e Mar do Norte. É, ainda, referido um aumento da variabilidade interanual, bem como uma diminuição da densidade de sistemas. Estes resultados podem ser corroborados por Ulbrich et al. (2008),

3. Métodos e Dados:

3.1. Esquema de Tracking:

Neste trabalho utilizou-se o esquema de *tracking* desenvolvido por Murray e Simmonds (1991), já com as alterações introduzidas posteriormente, e apresentadas em Simmonds e Murray (1999) e Simmonds et al. (1999).

Este algoritmo utiliza como dados de entrada a pressão ao nível médio do mar ou geopotencial em vários níveis isobáricos. Estes dados, inicialmente organizados numa grelha de latitude/longitude, são interpolados através de uma interpolação bi-cúbica para uma grelha estereográfica polar, centrada no polo norte. Em seguida o programa procura máximos do laplaciano da pressão (ou altura de geopotencial) fazendo-o através da comparação com os valores vizinhos de cada ponto da grelha. É então localizada a posição do mínimo de pressão (geopotencial) por aproximação interactiva ao centro do elipsóide que mais se ajusta aos dados de pressão da matriz. Nos casos em que tal se verifica a depressão é classificada de fechada (situação em que as isóbaras se fecham em torno de um mínimo de pressão). Caso tal não se verifique, o programa procura por uma depressão aberta. Esta busca é feita procurando pontos de inflexão no campo da pressão (figura 2).

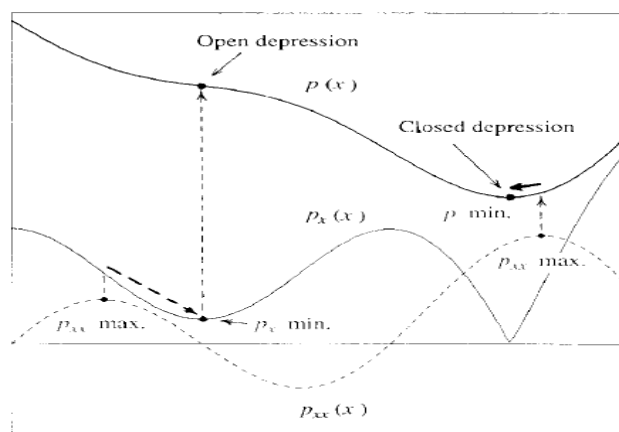


Fig.2 – Corte do campo da pressão ($p(x)$) e respectivas derivadas (p_x e p_{xx}) (Murray e Simmonds 1991).

⁵ Nome geralmente atribuído ao “caminho preferencial” dos ciclones numa determinada região.

Para garantir que apenas são seleccionados sistemas meteorologicamente significantes, o laplaciano da pressão entre o centro do ciclone e um determinado raio terá de ser superior a um valor definido previamente. Neste trabalho o valor usado foi de $0.2 \text{ hPa } ^\circ\text{lat}^{-2}$, tal como em Lim and Simmonds (2007). Após a identificação da depressão, prevê-se a sua posição num instante de tempo posterior. Seguidamente é calculada a probabilidade da depressão prevista corresponder à posição de uma das depressões encontradas no instante de tempo posterior. Para a correspondência máxima verificada entre as depressões existentes e a projectada, é assumida a nova posição da depressão, permitindo assim traçar o caminho de todos os sistemas identificados.

Uma outra condição inerente ao programa permite definir o tempo mínimo de vida de uma tempestade que é contabilizada no estudo. Tal como em Lim and Simmonds (2007) neste trabalho esse tempo mínimo é de 1 dia.

3.2. Variáveis:

De forma a poder estudar e melhor compreender as características das depressões, um conjunto de variáveis de saída pode ser obtido pelo algoritmo desenvolvido por Murray e Simmonds (1991). As variáveis estudadas neste trabalho são:

1. Intensidade:

$$\text{INT} = \nabla^2(p) \text{ (hPa } ^\circ\text{lat}^{-2}) \quad [\text{Equação 1}]$$

A intensidade de cada sistema será estimada através do laplaciano médio da pressão entre o centro da tempestade e um determinado raio RO .

Para cada período temporal em estudo, é obtida a intensidade média de todos os ciclones que foram identificados em cada ponto da grelha.

2. Raio:

$$RO^2 = \frac{\sum_{i=1}^d r_i^2}{d} \text{ (} ^\circ\text{lat)} \quad [\text{Equação 2}]$$

Com,

r_i – distância entre o centro do ciclone e um ponto na sua margem onde $\nabla^2(p) = 0$.

d – número total de distâncias.

O raio da tempestade é definido como a raiz de uma média ponderada das distâncias entre o centro do ciclone e os locais na margem do ciclone onde $\nabla^2(p) = 0$.

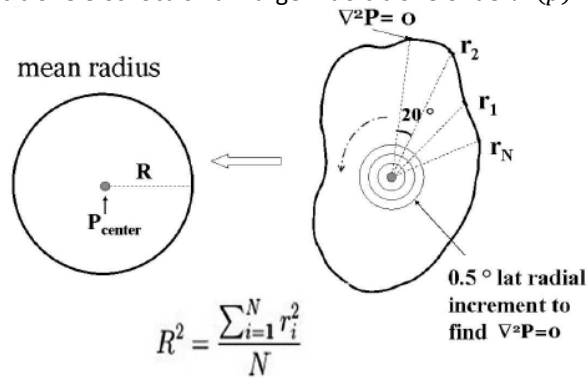


Fig.3 – Esquema representativo do cálculo da medida do raio (Lim e Simmonds, 2007).

Para cada período temporal em estudo, é obtido o raio médio de todos os ciclones que foram identificados em cada ponto da grelha.

3. Profundidade:

$$DP = 0.25 \times INT \times RO^2 \text{ (hPa)} \quad [\text{Equação 3}]$$

A profundidade da tempestade é uma medida da intensidade e dimensão da mesma. Representa a diferença de pressão entre a pressão média dos pontos colocados à distância do raio da tempestade, e a pressão mínima verificada no centro da tempestade. Para cada período temporal em estudo, é obtida a profundidade média de todos os ciclones que foram identificados em cada ponto da grelha.

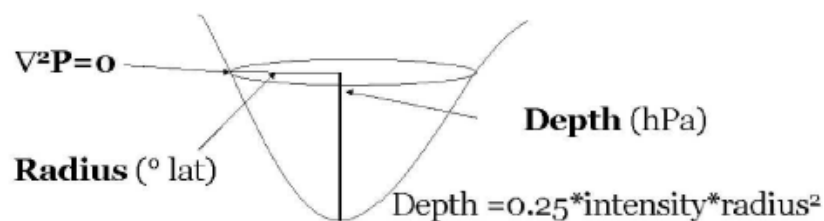


Fig.4 – Esquema representativo do cálculo da profundidade (Lim e Simmonds, 2007).

4. Ciclogénese:

$$FG = \frac{Ni}{1000 \text{ DLSQ} \times D} \quad [\text{Equação 4}]$$

Com,

Ni – Número de ciclogéneses em cada ponto da grelha.

1000DLSQ – Normalização pela área.

D – Período temporal em estudo.

A ciclogénese representa o aparecimento ou intensificação de uma tempestade. O local onde ocorre a ciclogénese de uma tempestade corresponde ao ponto onde a tempestade foi identificada pela primeira vez.

Para cada período temporal em estudo (D), obtém-se a variável FG, correspondente ao número de ciclogéneses por 1000 ° de latitude quadrados e por dia.

5. Ciclólise

$$FL = \frac{Nf}{1000 \text{ DLSQ} \times D} \quad [\text{Equação 5}]$$

Nf – Número de ciclólises em cada ponto da grelha.

1000DLSQ – Normalização pela área.

D – Período temporal em estudo.

Por contraposto à ciclogénese, a ciclólise corresponde à total dissipação de uma tempestade. O local da ciclólise corresponde ao ponto onde a tempestade foi identificada pela última vez.

Para cada período temporal em estudo (D), obtém-se a variável FL, correspondente ao número de ciclólises por 1000 ° de latitude quadrados e por dia.

6. Número total de tempestades:

$$TTD = \sum N \quad \text{[Equação 6]}$$

O número total de tempestades corresponde ao somatório de todas as tempestades que foram contabilizadas em cada ponto da grelha durante o período temporal em estudo.

7. Pressão central média:

$$\overline{Pc} = \frac{\sum_{i=1}^n Pc(n)}{N} \text{ (hPa)} \quad \text{[Equação 7]}$$

Pc(n) representa a pressão no centro de cada ciclone que passa em cada ponto da grelha. Para cada período temporal em estudo, é obtida a pressão média de todos os ciclones que foram identificados em cada ponto da grelha.

8. Densidade de sistemas:

$$SD = \frac{N}{1000 \text{ DLSQ}} \quad \text{[Equação 8]}$$

A densidade de sistemas representa o número de sistemas detectados em cada período temporal de estudo em cada ponto da grelha, normalizados por unidade de área.

N – número de sistemas detectados numa área de 10³ graus de latitude quadrados.
1000DLSQ – Normalização pela área.

3.3. Dados:

Ao longo deste trabalho vários conjuntos de dados serão utilizados para estudar as características acima mencionadas. Assim, de forma a estudar a actividade ciclónica no clima actual foram seleccionados 4 conjuntos de dados: Reanálises ERA 40, Reanálises NCEP I, Modelo ECHAM5 e Modelo CCSM3. Como recomendado pela WMO⁶ na definição de uma climatologia, deve ser considerado um período de 30 anos. Neste estudo é considerado o período entre 1971 e 2000⁷. Será também estudada a actividade ciclónica num clima futuro, compreendido entre os anos 2071 e 2100⁶. Para tal, são considerados os modelos ECHAM5 e CCSM3. Diga-se, ainda, que as corridas dos modelos para o clima futuro são baseadas no cenário A2⁸ do quarto relatório do IPCC (2007)⁹.

Todos os dados utilizados correspondem a dados de pressão ao nível médio do mar, com resolução temporal de 6 horas e resolução horizontal de 2.5° X 2.5° (latitude X longitude).

⁶ World Meteorological Organization

⁷ Por indisponibilidade de dados, para o modelo CCSM3 os anos de 2000 e 2100 não são contabilizados.

⁸ Nakicenovic et al (2000)

⁹ Intergovernmental Panel on Climate Change

Nas subsecções 3.3.1 a 3.3.5 são referidos outros detalhes sobre as fontes de dados e cenário climático usado.

3.3.1. Reanálises ERA40:

As reanálises ERA40 (Uppala et al. 2005) correspondem a um projecto do ECMWF¹⁰ para reconstruir o estado da atmosfera global durante um período de 45 anos (entre Setembro de 1957 e Agosto de 2002). Estas são geradas através do modelo operacional de previsão a médio prazo do ECMWF, que opera com uma resolução horizontal T159 (aproximadamente 1° X 1° (longitude X latitude)), e 60 níveis verticais.

3.3.2. Reanálises NCEP I:

As Reanálises NCEP I (Kalnay et al., 1996) são um projecto da entidade norte americana NCEP, e tal como as reanálises ERA40 (acima referidas) têm como finalidade reproduzir o estado da atmosfera global, neste caso desde 1948 até ao presente. São realizadas através do modelo operacional da mesma entidade, com uma resolução horizontal T62 (aproximadamente 2° X 2° (longitude X latitude)), e 28 níveis verticais.

Os resultados obtidos com as reanálises NCEP I, e que serão utilizados neste trabalho, são os obtidos no projecto de final de licenciatura de Teixeira, Marta (2011).

3.3.3. Modelo ECHAM5:

O modelo ECHAM5 (Roeckner E. et al., 2009) corresponde à quinta versão do modelo ECHAM desenvolvido pelo Instituto de Meteorologia de Max Planck. Este modelo foi desenvolvido a partir de modelos desenvolvidos no ECMWF, com a finalidade de realizar estudos climáticos. Este é um modelo climático global, com interacção oceânica e corre com uma resolução horizontal T63 (aproximadamente 2° X 2° (longitude X latitude)) e resolução vertical de 31 níveis.

3.3.4. Modelo CCSM3:

O modelo CCSM3 (Collins et al., 2005) corresponde à terceira versão do modelo CCSM que é um modelo climático global desenvolvido pela University Corporation for Atmospheric Research¹¹ com a finalidade de realizar estudos de ordem climática. Este modelo corre com a interacção de vários módulos (atmosférico, oceânico e superfície terrestre). O módulo atmosférico corre a uma resolução horizontal T85 (aproximadamente 1.4° X 1.4° (longitude X latitude)) e com 26 níveis verticais.

¹⁰ European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

¹¹ UCAR

3.3.5. Cenário Climático A2:

O IPCC foi criado em 1988 com o objectivo de monitorizar e compreender as alterações climáticas. Procura oferecer ao mundo uma visão científica e clara do estado actual do clima mundial e eventuais alterações futuras do mesmo. Com isto procura-se saber, ainda, que consequências ambientais e socioeconómicas daí podem advir.

Vários relatórios têm sido publicados ao longo dos últimos anos, tendo o mais recente (quarto) sido publicado em 2007. Nesse relatório são usados vários cenários futuros, sendo estes função das preocupações ambientais do planeta por oposição às preocupações económicas. Este balanço traduzir-se-á na quantidade de gases com efeito de estufa que serão lançados na atmosfera ao longo dos anos. No ano 2000 foi publicado um relatório com os diversos cenários traçados pelo IPCC para o período 2000 a 2100, e que serviu de base para a elaboração do terceiro e quarto relatórios do mesmo painel. Quatro famílias de cenários são apresentadas: A1, A2, B1 e B2. Neste trabalho foi considerado o cenário A2 (Nakicenovic et al, 2000), que apresenta as seguintes características:

- a) Mundo independente na forma de actuar, com nações auto suficientes.
- b) A população mundial cresce de forma contínua.
- c) Planeta regionalmente orientado para o desenvolvimento económico.
- d) Desenvolvimento tecnológico mais lento e fragmentado, com melhorias nos rendimentos *per capita*.

O cenário A2 é assim um cenário “pessimista”, reflectindo um mundo mais dividido e com maiores preocupações económicas.

3.4. Domínio de estudo e Tratamento estatístico:

Como já foi referido, anteriormente, neste trabalho procura-se compreender a actividade ciclónica verificada na região do Atlântico Norte. Para tal foi necessário definir um domínio de interesse para o estudo das diversas variáveis que caracterizam a mesma actividade (figura 5). Além de abranger quase a totalidade do oceano Atlântico Norte, procurou-se incorporar uma parte da costa leste da América do Norte, dada a sua importância na formação de novas tempestades, bem como boa parte da Europa Ocidental, por forma a poder verificar que impacto as tempestades têm nesta região, particularmente em Portugal Continental.

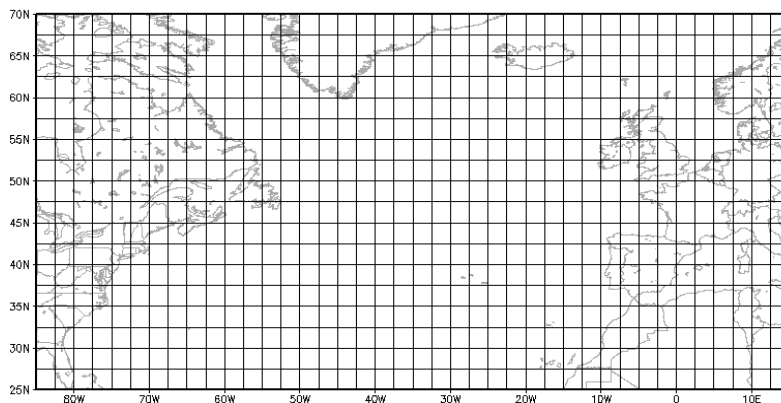


Fig.5 – Domínio de estudo. Limitação zonal: 85W – 15E; Limitação meridional: 25N – 70N.

Dado que a actividade ciclónica varia em grande escala conforme a estação do ano em causa, os resultados serão analisados por trimestres, considerando-se que cada um é representativo de uma estação do ano:

- a) Inverno: Dezembro, Janeiro e Fevereiro.
- b) Primavera: Março, Abril e Maio.
- c) Verão: Junho, Julho e Agosto.
- d) Outono: Setembro, Outubro e Novembro.

Por forma a melhor compreender as características dos ciclones nos dois períodos em causa (1971-2000 e 2071-2100), foi elaborado um tratamento estatístico das diversas variáveis. Para tal foram calculadas as médias e os desvios padrão dos 30 anos de estudo. Com o intuito de verificar eventuais tendências das diversas características calculou-se, também, a tendência e a respectiva significância estatística. Para tal foi utilizada a função de distribuição t-student, definida abaixo (equação 8), com um nível de significância de 95%.

$$t = \frac{XM - XL}{\sqrt{\frac{SM^2}{NM} + \frac{SL^2}{NL}}} \quad [\text{Equação 8}]$$

Com,

XM média da série M;

XL média da série L;

SM desvio padrão da série M;

SL desvio padrão da série L;

NM número de elementos da série M;

NL número de elementos da série L;

4. Resultados/Discussão:

Nesta secção serão apresentados os resultados obtidos para os dois períodos em estudo. Além da análise climatológica das diversas variáveis e das suas tendências, serão também comparados os diversos conjuntos de dados (ERA40, NCEP I, ECHAM5 e CCSM3).

4.1. Clima actual (1971-2000):

4.1.1. Média:

Ciclogénese (FG):

As figuras 6, 7, 8 e 9 mostram os campos médios de ciclogénese no verão (direita) e inverno (esquerda), para ERA40, NCEP I, ECHAM5 e CCSM3, respectivamente. Facilmente podem identificar-se várias zonas onde ocorrem mais ciclogénese. Destacam-se a costa leste da América do Norte, as altas latitudes junto da Islândia e Escandinávia, bem como junto à região alpina. Os máximos verificados junto da costa leste da América do Norte estarão muito interligados com o posicionamento das montanhas rochosas a ocidente desta região, e em grande parte também ao posicionamento da corrente de jacto, que tendencialmente é muito intensa nessa região. Tal como foi dito na introdução, estes são dois factores preponderantes na formação de ciclones. O posicionamento da corrente de jacto explicará também os

máximos verificados nas latitudes mais elevadas junto da Islândia e Escandinávia, enquanto o máximo encontrado junto aos Alpes deverá em grande parte à presença da referida cadeia montanhosa.

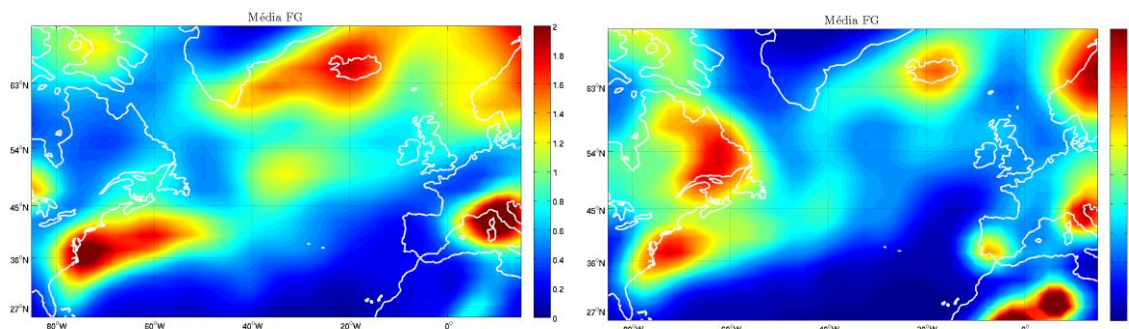


Fig.6 – Ciclogénese ($^{\circ} \text{lat}^{-2} \text{dia}^{-1}$) no inverno (esquerda) e verão (direita) – Reanálises ERA40.

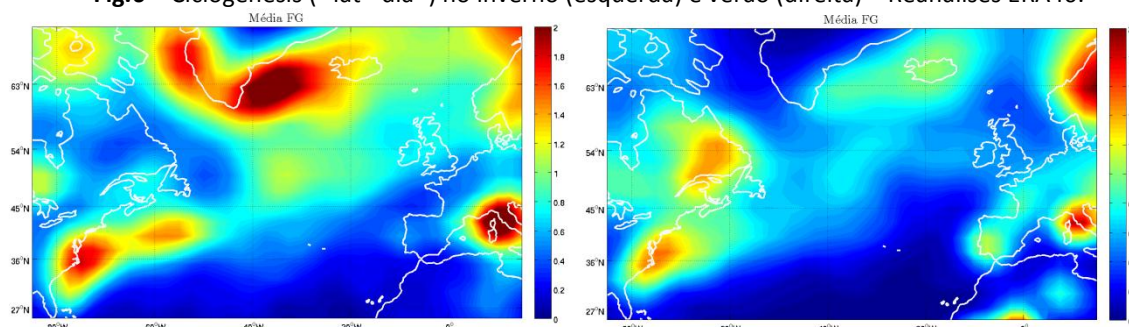


Fig.7 – Ciclogénese ($^{\circ} \text{lat}^{-2} \text{dia}^{-1}$) no inverno (esquerda) e verão (direita) – Reanálises NCEP I.

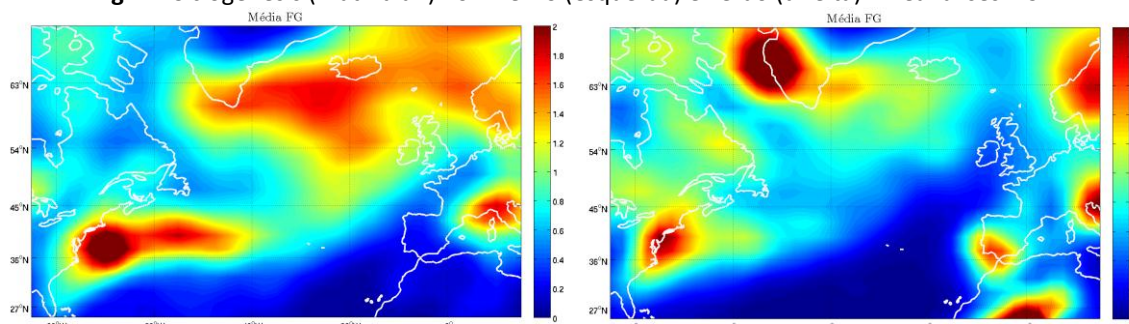


Fig.8 – Ciclogénese ($^{\circ} \text{lat}^{-2} \text{dia}^{-1}$) no inverno (esquerda) e verão (direita) – Modelo ECHAM5.

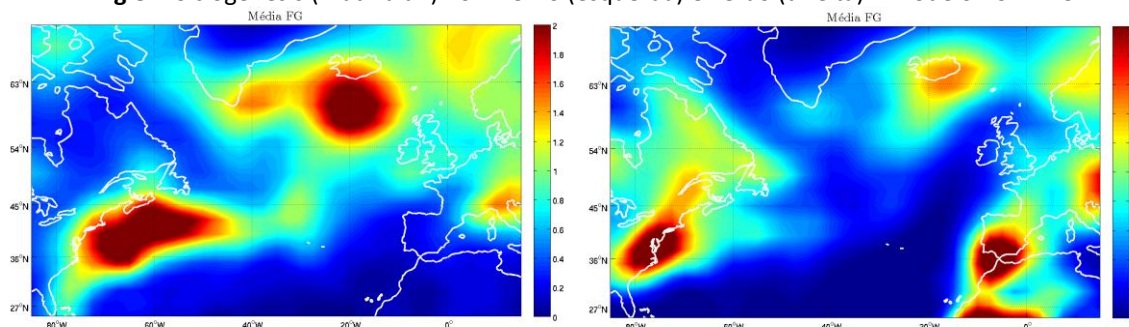


Fig.9 – Ciclogénese ($^{\circ} \text{lat}^{-2} \text{dia}^{-1}$) no inverno (esquerda) e verão (direita) – Modelo CCSM3.

Comparando as duas estações do ano, verifica-se que existe um ligeiro desvanecimento dos máximos no verão, acompanhados de pequenas alterações na posição dos mesmos. Uma das alterações mais significativas verifica-se com o surgimento de um máximo relativo entre o sul da Península Ibérica e o norte de África, possivelmente ligado ao surgimento de baixas térmicas típicas desta região na época de

verão. Este máximo verificado no verão é mais intenso no caso dos dois modelos (ECHAM5 e CCSM3). De resto, refira-se que os máximos tendem a ser mais expressivos nos dois modelos por comparação às duas reanálises, embora estes reproduzam muito satisfatoriamente os padrões verificados em ambas as reanálises. Olhando aos padrões obtidos pelas 2 reanálises pode-se verificar que estes apresentam um elevado grau de concordância, embora as reanálises ERA40 mostrem um número superior de ciclogêneses, em especial no verão.

Ciclólise (FL):

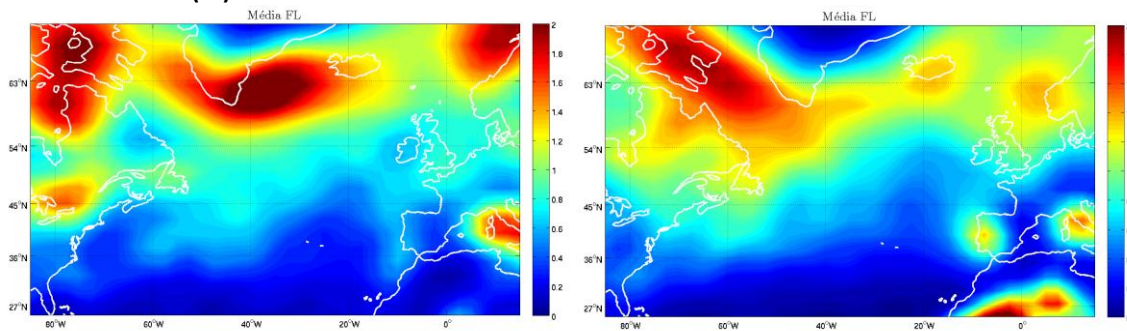


Fig.10 – Ciclólises ($^{\circ} \text{lat}^{-2} \text{dia}^{-1}$) no inverno (esquerda) e verão (direita) – Reanálises ERA40.

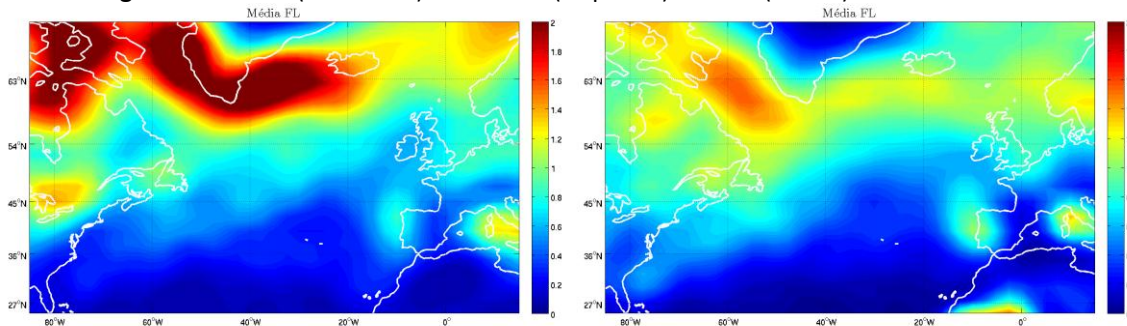


Fig.11 – Ciclólises ($^{\circ} \text{lat}^{-2} \text{dia}^{-1}$) no inverno (esquerda) e verão (direita) – Reanálises NCEP I.

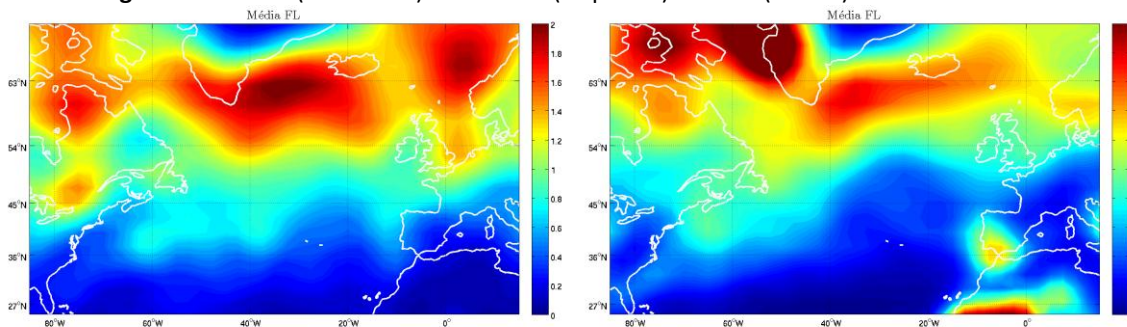


Fig.12 – Ciclólises ($^{\circ} \text{lat}^{-2} \text{dia}^{-1}$) no inverno (esquerda) e verão (direita) – Modelo ECHAM5.

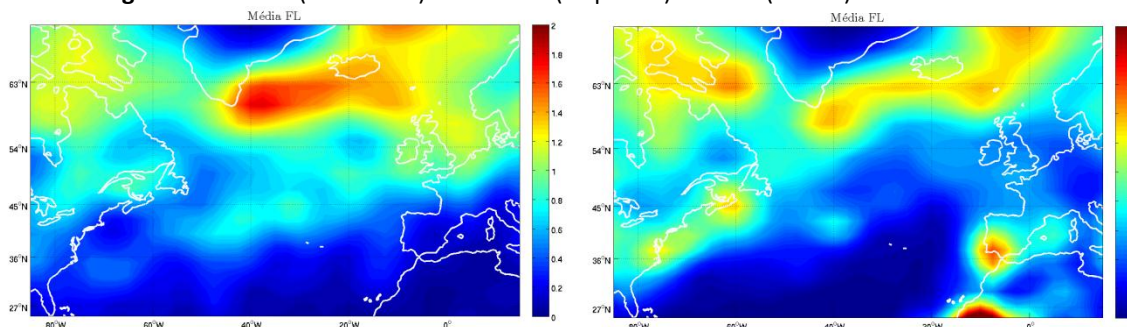


Fig.13 – Ciclólises ($^{\circ} \text{lat}^{-2} \text{dia}^{-1}$) no inverno (esquerda) e verão (direita) – Modelo CCSM3.

No que respeita às ciclólises (figuras 10 a 13) são, também, facilmente identificáveis os locais onde as tempestades têm tendência a dissipar-se. As altas latitudes são os locais que apresentam maiores valores de ciclólises, em especial em torno da Gronelândia, entre os 65°N e os 70 °N. Uma das causas para os elevados valores verificados nesta região deverá prender-se com o centro de altas pressões que normalmente se situa sobre a Gronelândia. Este anticiclone é de origem térmica, devido às baixas temperaturas que se registam neste local, favorecendo assim o seu posicionamento ao longo de todo o ano, desviando e levando à dissipação dos ciclones que ali chegam. À semelhança do verificado na ciclogénese, pode verificar-se o aparecimento de um novo máximo relativo no verão entre o sul da Península Ibérica e o norte de África. Este posicionamento reforça a ideia destes máximos estarem relacionados com o surgimento de baixas térmicas, pois estas são depressões quase estacionárias.

Comparando as duas estações do ano pode verificar-se que os valores registados durante o verão são ligeiramente inferiores aos verificados no inverno registando-se, também, ligeiras alterações no posicionamento dos máximos.

Comparando as reanálises pode-se verificar que estas apresentam um elevado grau de concordância, diferindo principalmente no verão, onde as reanálises ERA40 mostram máximos mais expressivos que as reanálises NCEP I. Os modelos mostram um padrão bastante aproximado ao verificado nas reanálises, porém o modelo CCSM3 apresenta valores máximos menos expressivos, por comparação aos verificados nas reanálises.

Número total de tempestades (TN):

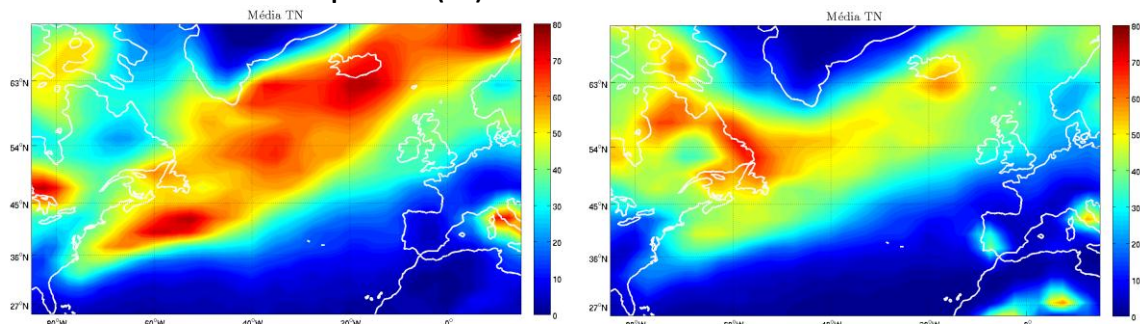


Fig.14 – Número total de tempestades no inverno (esquerda) e verão (direita) – Reanálises ERA40

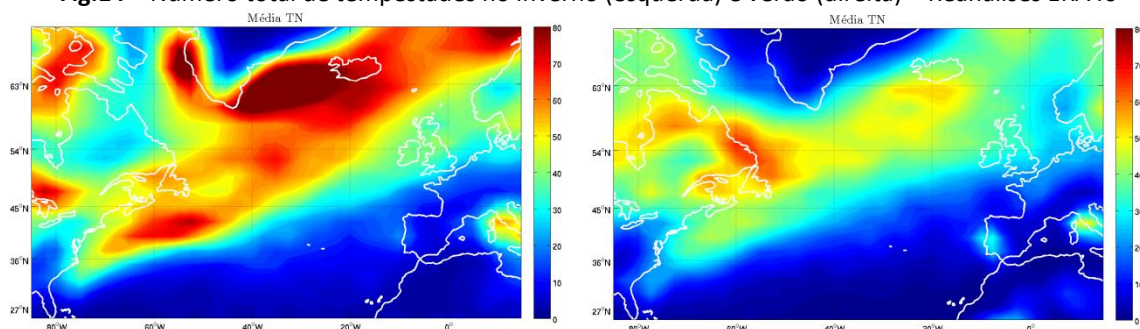


Fig.15 – Número total de tempestades no inverno (esquerda) e verão (direita) – Reanálises NCEP I

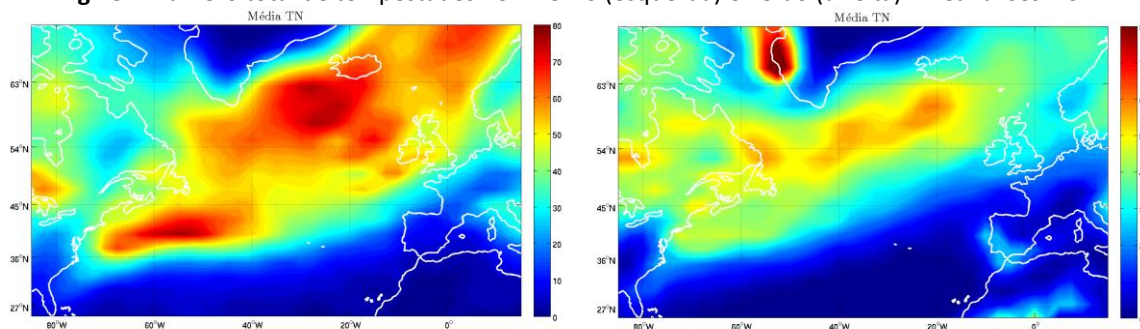


Fig.16 – Número total de tempestades no inverno (esquerda) e verão (direita) – Modelo ECHAM5

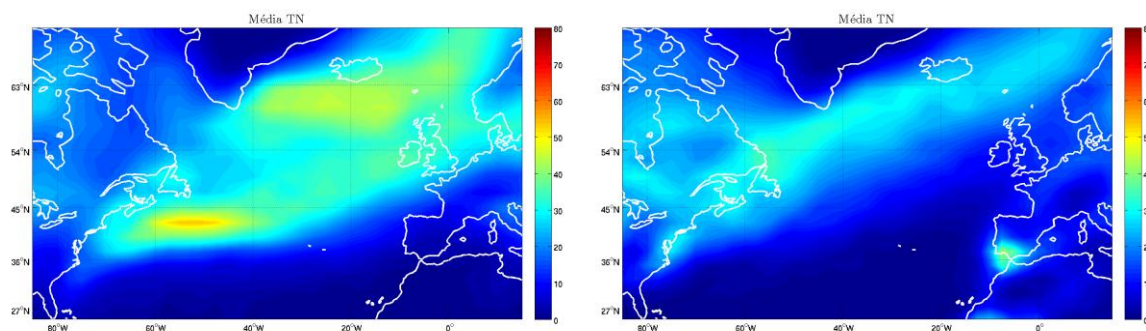


Fig.17 – Número total de tempestades no inverno (esquerda) e verão (direita) – Modelo CCSM3

As figuras 14 a 17 mostram o número médio do total de tempestades que passou em cada trimestre em cada ponto da grelha. Verifica-se, claramente, uma faixa que tem o seu início na costa leste da América do Norte e se prolonga para nordeste até à Península da Escandinávia, onde os valores médios do número de ciclones são superiores. Esta região indica que existe um caminho preferencial para as tempestades (*storm track*), que tendem a formar-se na costa leste Americana (visto acima) e viajam posteriormente pelo Atlântico em direcção a nordeste, dissipando-se posteriormente nas altas latitudes. Outro facto a notar prede-se com a maior quantidade de ciclones observados sobre o oceano por comparação com o interior dos continentes. Como seria de esperar, a época de inverno apresenta um maior número de ciclones do que a época de verão. Durante os meses de Junho, Julho e Agosto é notório, também, o aparecimento de um máximo relativo entre o sul da península Ibérica e o norte de África.

As reanálises NCEP I apresentam uma média superior a 100 ciclones por inverno entre a Islândia e a Gronelândia, sendo que este máximo não surge de forma tão acentuada em mais nenhum dos 3 conjuntos de dados.

Quanto aos modelos, estes representam bem os padrões identificados nas reanálises, verificando-se apenas que o modelo CCSM3 parece produzir menos sistemas que os outros 3 conjuntos de dados.

Densidade de sistemas (SD):

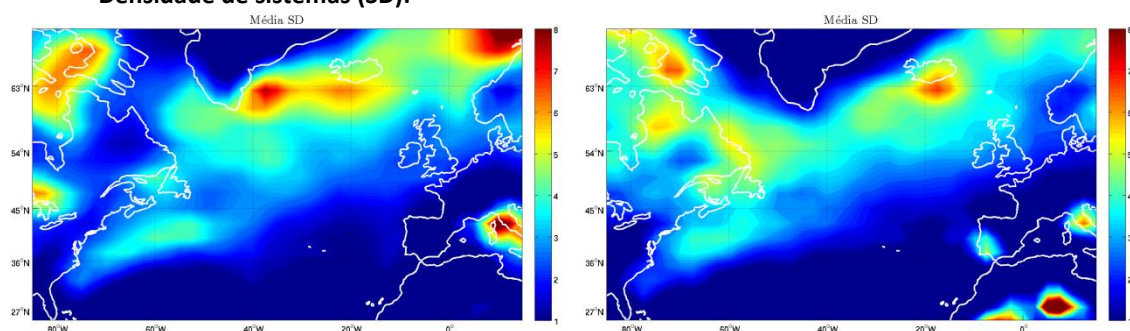


Fig.18 – Densidade de sistemas (número médio por $10^3 \text{ }^\circ \text{ lat}^2$) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Reanálises ERA40

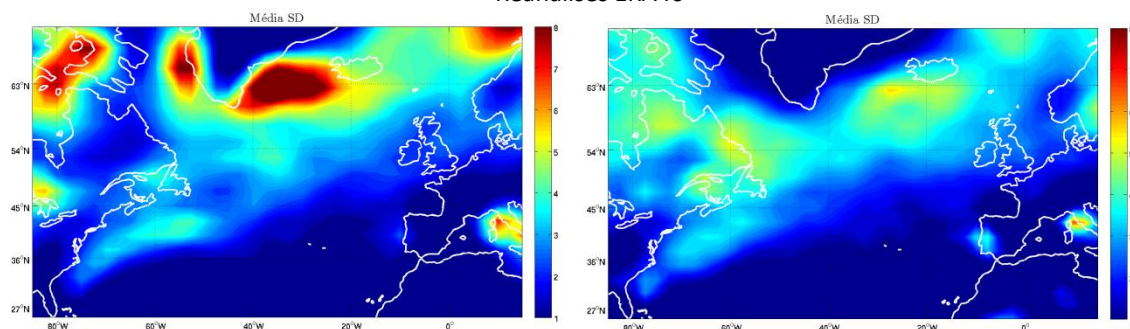


Fig.19 – Densidade de sistemas (número médio por $10^3 \text{ }^\circ \text{ lat}^2$) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Reanálises NCEP I

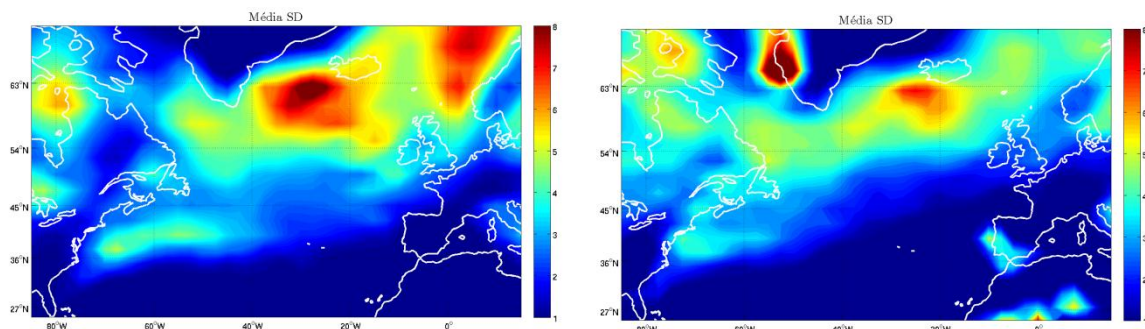


Fig.20 – Densidade de sistemas (número médio por $10^3 \text{ }^\circ \text{ lat}^2$) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Modelo ECHAM5

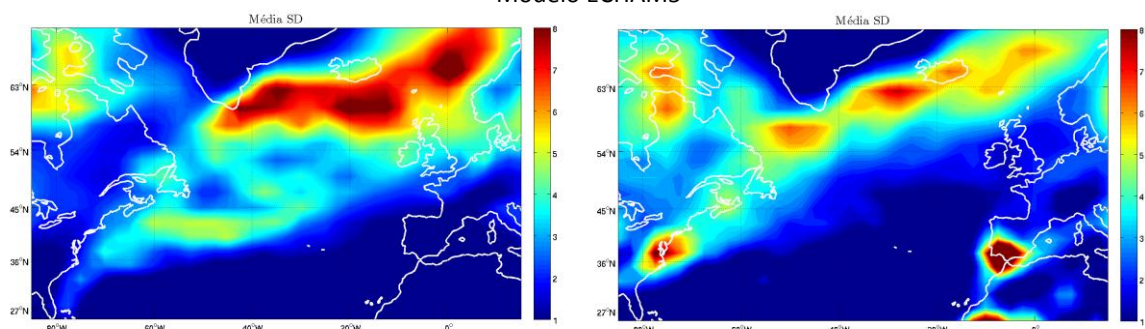


Fig.21 – Densidade de sistemas (número médio por $10^3 \text{ }^\circ \text{ lat}^2$) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Modelo CCSM3

A densidade de sistemas representa o número médio anual de tempestades por unidade de área. Esta variável mostra os locais onde tendencialmente ocorrem mais ciclones, verificando-se que é nas altas latitudes do Canadá e em torno da Gronelândia que se encontram os locais mais propícios para a presença de ciclones. Como era de esperar a densidade de sistemas no verão é inferior à verificada no inverno.

Pode-se verificar que os padrões NCEP I e ERA 40 são muito semelhantes. Contudo, verifica-se que no inverno o padrão NCEP I apresenta maior expressividade, enquanto no verão verifica-se o inverso.

Olhando aos modelos, verifica-se que estes reproduzem de forma muito satisfatória os padrões obtidos através das reanálises.

Profundidade (DP):

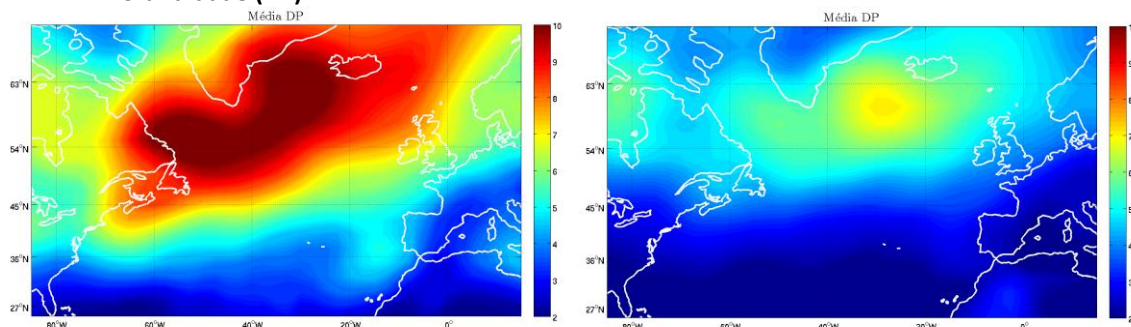


Fig.22 – Profundidade (hPa) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Reanálises ERA40

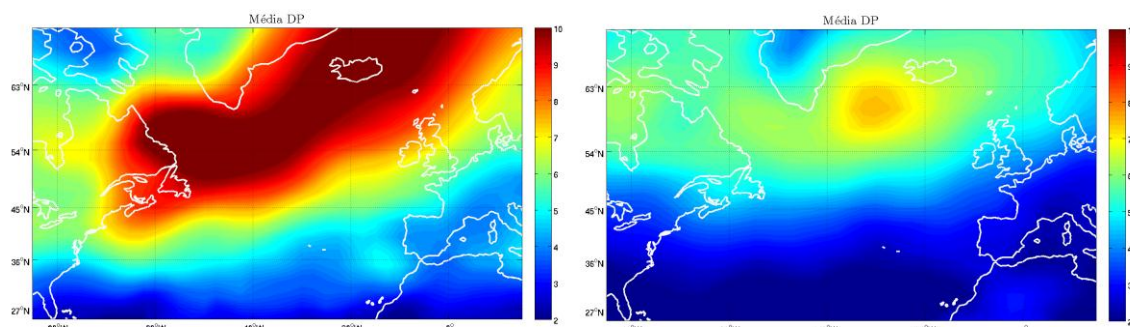


Fig.23 – Profundidade (hPa) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Reanálises NCEP I

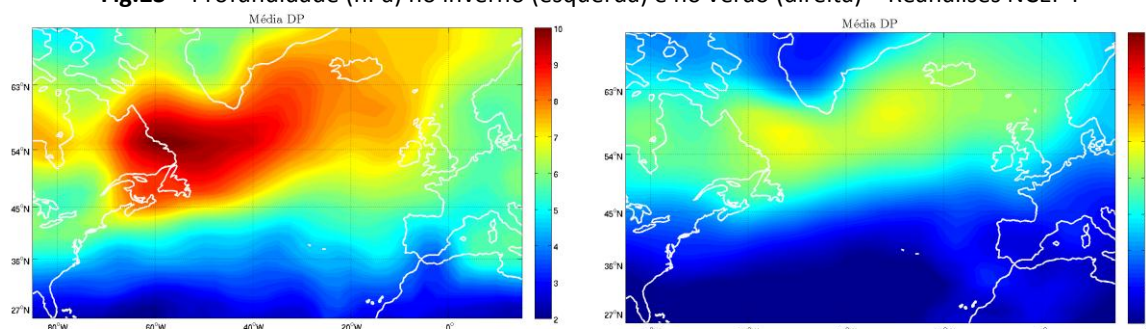


Fig.24 – Profundidade (hPa) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Modelo ECHAM5

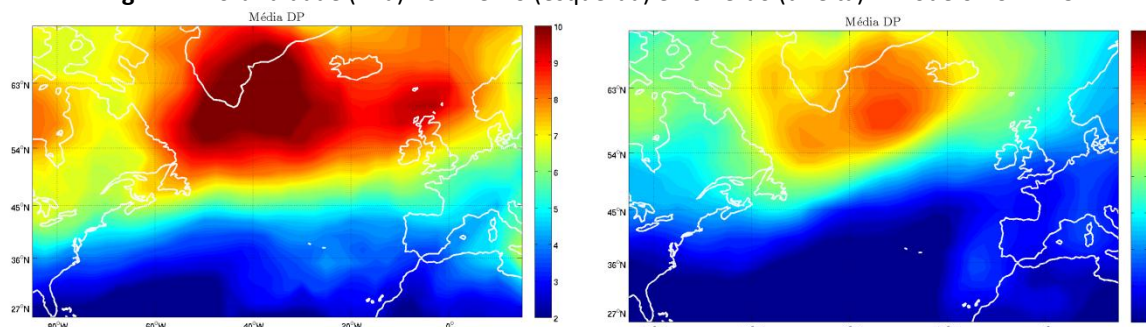


Fig.25 – Profundidade (hPa) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Modelo CCSM3

As figuras 22 a 25 mostram os campos médios da profundidade dos ciclones em cada ponto da grelha. Esta medida pode ser tomada como um parâmetro de intensidade da tempestade, pois à partida quanto mais profunda esta for, mais intensa poderá ser. Contudo este não é um aspecto linear, pois podemos ter tempestades muito profundas, mas com gradientes horizontais de pressão reduzidos, por comparação a outras tempestades que se apresentem igualmente profundas mas com gradientes de pressão superiores.

Olhando aos resultados obtidos podemos verificar que as depressões mais profundas tendem a situar-se nas altas latitudes, especialmente no norte/nordeste do Canadá, e na região atlântica compreendida entre o norte/noroeste do Reino Unido, Península Escandinávia e a Gronelândia. Durante o período de verão verifica-se uma redução da profundidade média dos ciclones.

Os padrões reproduzidos pelos quatro conjuntos de dados são bastante concordantes.

Pressão no centro (PC):

Tal como o verificado acima na variável profundidade, a pressão no centro do ciclone (figuras 24 a 27) também pode se tomada como uma medida de intensidade. Contudo, o mesmo problema acima referido é, também, válido aqui.

Pode verificar-se que as tempestades com menor pressão no seu centro ocorrem preferencialmente em pleno oceano Atlântico a norte/noroeste das Ilhas Britânicas e Escandinávia. Verifica-

se, também, que as tempestades no período de verão apresentam pressões centrais claramente superiores às verificadas no inverno.

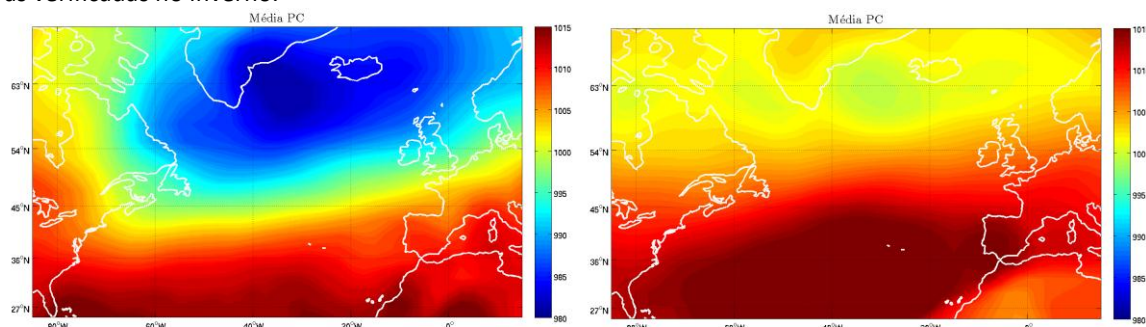


Fig.26 – Pressão no centro (hPa) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Reanálises ERA40

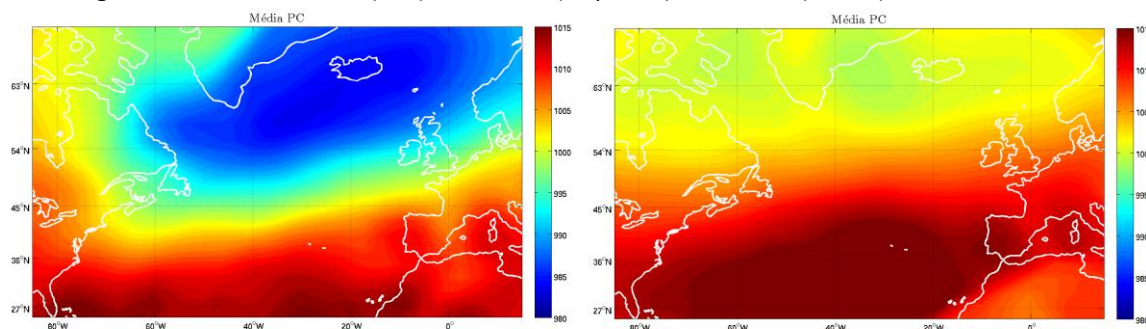


Fig.27 – Pressão no centro (hPa) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Reanálises NCEP I.

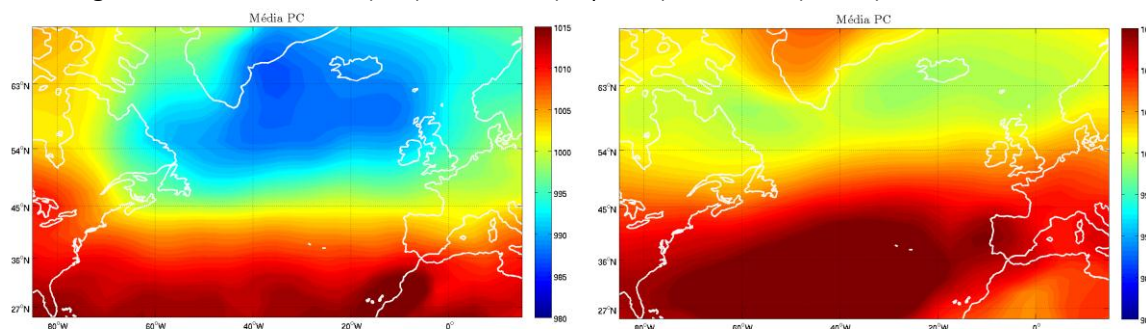


Fig.28 – Pressão no centro (hPa) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Modelo ECHAM5.

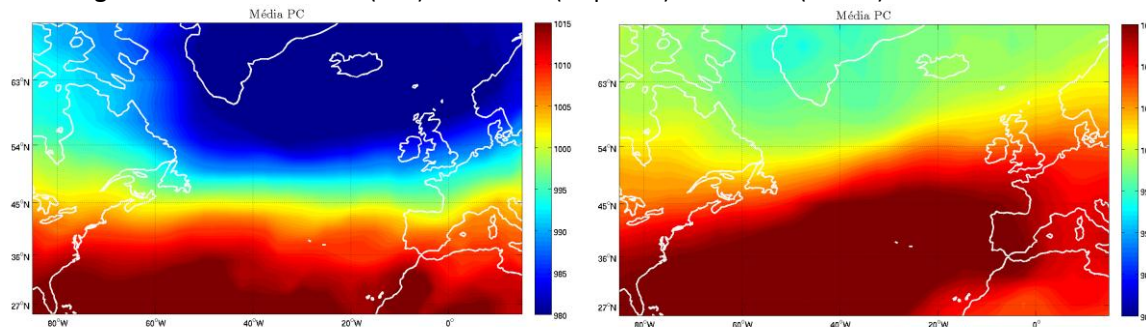


Fig.29 – Pressão no centro (hPa) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Modelo CCSM3.

Os padrões verificados nos 4 conjuntos de dados mostram-se bastante semelhantes, verificando-se apenas que as depressões do modelo CCSM3 tendem a ter menor pressão central nas latitudes mais elevadas e pressão central ligeiramente superior nas mais baixas por comparação aos restantes.

Raio (RO):

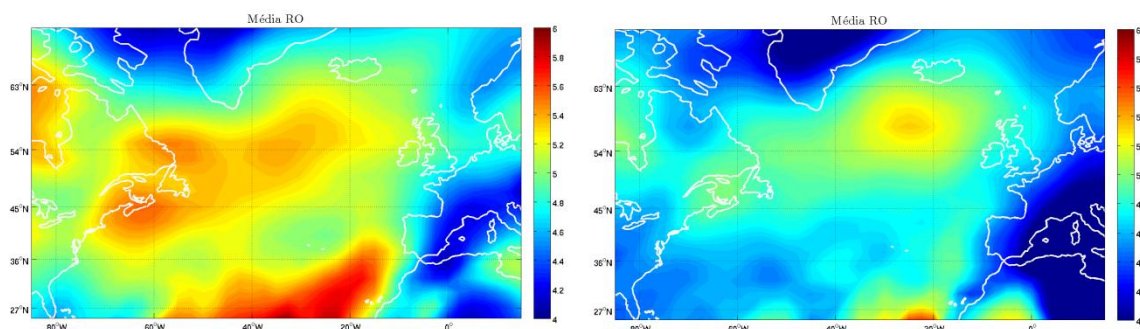


Fig.30 – Raio ($^{\circ}$ lat) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Reanálises ERA40

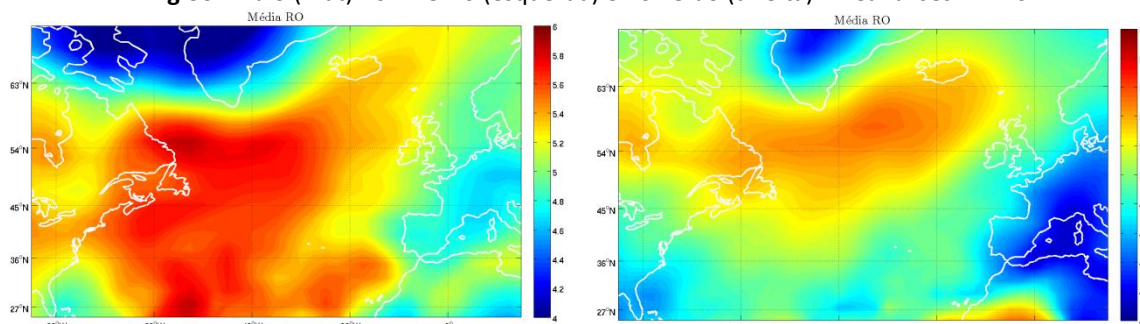


Fig.31 – Raio ($^{\circ}$ lat) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Reanálises NCEP I

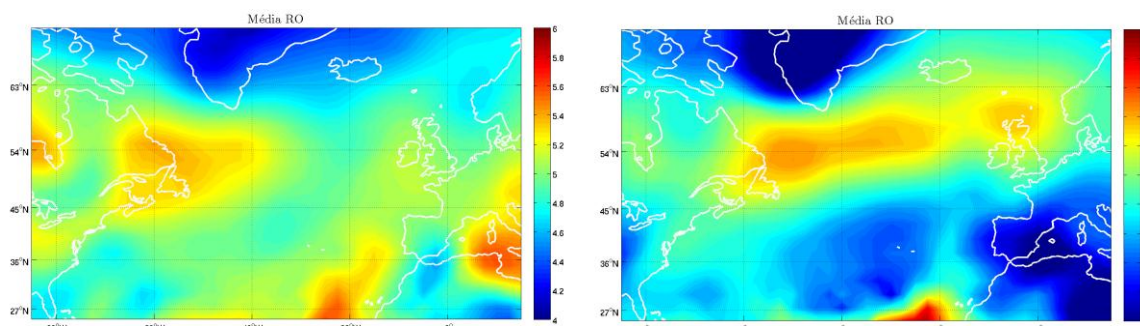


Fig.32 – Raio ($^{\circ}$ lat) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Modelo ECHAM5

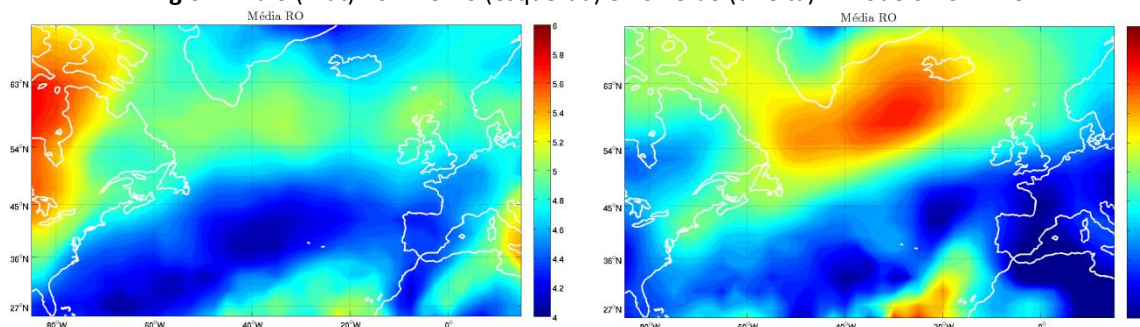


Fig.33 – Raio ($^{\circ}$ lat) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Modelo CCSM3

As figuras 30 a 33 mostram o raio médio das depressões em cada ponto da grelha. Pode-se verificar que depressões maiores tendem a ocorrer sobre o oceano, diminuindo o seu tamanho quando se encontram sobre terra. A água quente da superfície oceânica funciona como fonte de vapor de água para as depressões, facilitando o seu processo de desenvolvimento. Como foi visto acima, é na região mais a norte

do oceano Atlântico que se encontram as depressões mais profundas e com menores pressões centrais, e tal estará, certamente, relacionado com os máximos verificados no raio nas latitudes elevadas. Note-se que as depressões durante a época de verão tendem a ter uma dimensão menor, em especial nas regiões entre os 25°N e os 45°N.

Comparando as reanálises entre si observa-se que as NCEP I apresentam ciclones com raio médio superior aos ciclones gerados pelas reanálises ERA40.

Olhando aos resultados obtidos com os dados dos modelos verifica-se que as depressões por eles geradas são inferiores em tamanho às geradas pelas reanálises. Esta diferença é especialmente visível no modelo CCSM3 no período de inverno. Contudo, os padrões verificados nas reanálises são relativamente bem reproduzidos nos modelos, excepto para o período de inverno obtido do modelo CCSM3, onde as depressões na região atlântica se apresentam com uma dimensão muito reduzida.

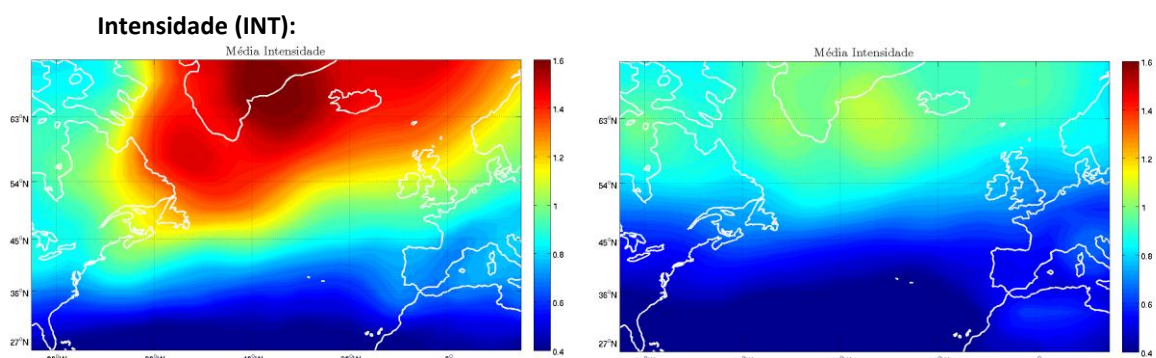


Fig.34 – Intensidade ($\text{hPa } (^{\circ} \text{ lat})^{-2}$) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Reanálises ERA40

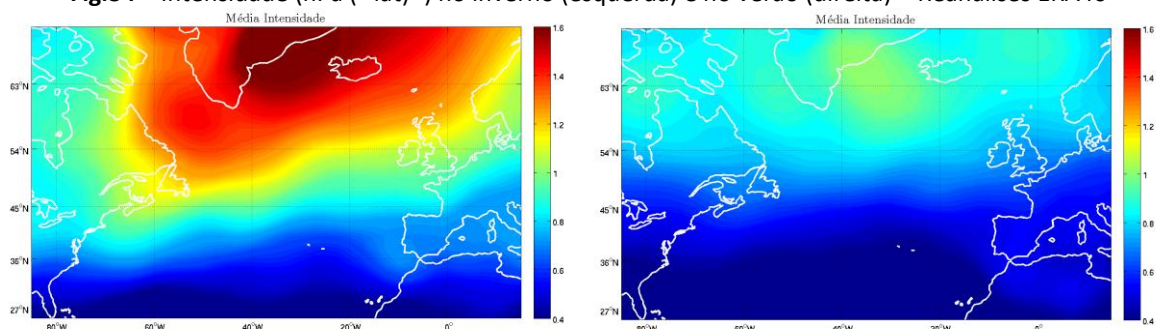


Fig.35 – Intensidade ($\text{hPa } (^{\circ} \text{ lat})^{-2}$) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Reanálises NCEP I

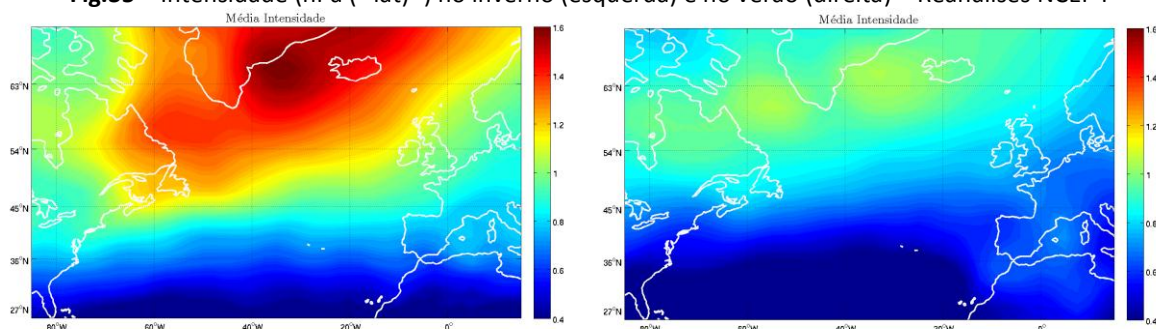


Fig.36 – Intensidade ($\text{hPa } (^{\circ} \text{ lat})^{-2}$) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Modelo ECHAM5

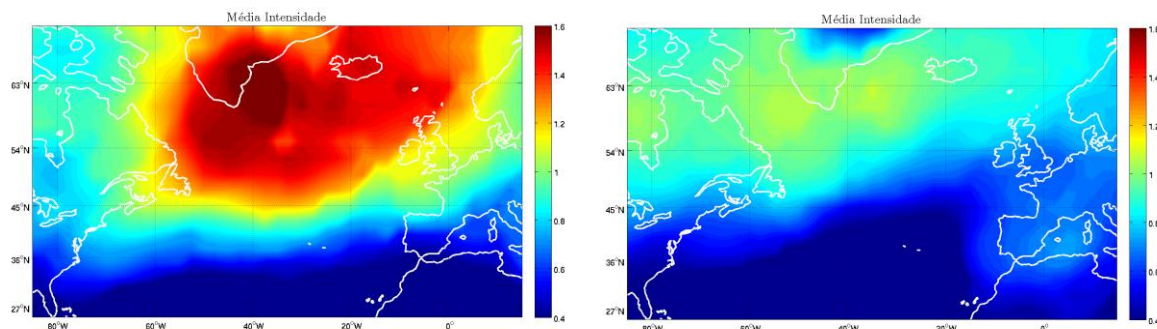


Fig.37 – Intensidade ($\text{hPa } (^\circ \text{lat})^{-2}$) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Modelo CCSM3

As figuras 32 a 35 mostram a intensidade média das depressões que passaram em cada ponto da grelha nos 30 anos em estudo. Como já referido, acima, nos campos médios da profundidade e da pressão central das depressões, as tempestades mais intensas ocorrem nas altas latitudes, preferencialmente entre a costa leste do Canadá, norte/noroeste das Ilhas Britânicas/Península Escandinávia e a Gronelândia. Verifica-se, também, uma diminuição significativa da intensidade no período de verão.

As tempestades produzidas pelo modelo CCSM3 tendem a ser ligeiramente mais intensas que as verificadas nos restantes conjuntos de dados. Contudo os quatro padrões obtidos para cada estação mostram-se muito semelhantes.

4.1.2. Desvio Padrão:

Nesta secção analisados os campos do desvio padrão das seguintes características dos ciclones: número total de tempestades, raio e intensidade. Apenas se teve em consideração estas características por se considerar serem as mais relevantes para fornecer uma visão da variabilidade interanual da quantidade de tempestades, da sua dimensão e intensidade. A análise será feita para os períodos de inverno e verão.

Por economia de espaço as imagens desta secção foram colocadas em anexo.

Número total de tempestades:

As figuras 1-A a 4-A, ilustradas em anexo, mostram o desvio padrão do número total de tempestades durante o período 1971-2000. Pode-se verificar que as zonas de maior desvio padrão situam-se nas latitudes acima dos 45°N , com excepção da Gronelândia. Refira-se que é nestas regiões que ocorre o maior número de tempestades, e por isso é perceptível que o desvio padrão tenda a ser maior também. O número de tempestades que ocorre num local em cada ano está dependente de vários factores, e um deles prede-se com padrões de teleconexão, como ENSO¹² ou NAO¹³. Estes padrões são função da circulação de larga escala e variam de ano para ano, sendo responsáveis por grande parte da variabilidade interanual verificada através do desvio padrão. Repare-se que os 4 conjuntos de dados produzem padrões de desvio padrão semelhantes, contudo o modelo CCSM3 mostra-se claramente como aquele onde a variabilidade interanual é superior. Comparando os períodos de verão e inverno pode-se verificar que o desvio padrão é inferior no verão.

Raio:

Analisando as figuras do desvio padrão do raio (5-A a 8-A) pode-se verificar que as zonas de maior desvio padrão se localizam nas latitudes mais baixas do oceano Atlântico. Recorde-se que foi verificado anteriormente que as depressões de maior dimensão tendem a ocorrer sobre o oceano e também nestas latitudes (especialmente no período de inverno). Uma das explicações para a maior dimensão das

¹² El Niño - Southern Oscillation

¹³ North Atlantic Oscillation

tempestades sobre o oceano, avançada na secção anterior, foi a presença das águas superficiais oceânicas mais quentes, que funcionariam como fonte de vapor de água para a tempestade, favorecendo o seu desenvolvimento. Poderá assim relacionar-se, também, a variabilidade associada nesta região a eventuais variações anuais das SST. Note-se que os 4 conjuntos de dados apresentam resultados de desvio padrão muito semelhante entre si, não se verificando também grande diferença entre a variabilidade no inverno e no verão.

Intensidade:

As figuras A-9 a A12 mostram o desvio padrão associado à intensidade. No inverno, as regiões sobre o oceano, em especial nas latitudes mais elevadas mostram também ser dos locais onde a intensidade mais varia. Note-se, também, junto da costa oeste da Península Ibérica valores assinaláveis de desvio padrão. O período de verão mostra algumas diferenças em relação aos meses de inverno, verificando-se que a maior variabilidade na intensidade passa a registar-se nas latitudes mais a sul. Repare-se, ainda, que um máximo relativo de desvio padrão pode ser identificado no modelo ECHAM5, junto à costa noroeste de África. A variabilidade desta característica poderá relacionar-se, tal como foi referido acima, com variações nos padrões de teleconexão, e consequentes variações no posicionamento da *storm track*. Ambas as reanálises mostram um padrão semelhante. O modelo ECHAM5 é aquele que mais se aproxima dos resultados obtidos com reanálises, sendo que o modelo CCSM3 mostra uma elevada variabilidade na grande maioria do domínio.

4.1.3. Tendências:

Ciclogénese (FG):

As imagens 38 a 41 mostram a tendência da ciclogénese verificada durante os 30 anos de estudo. Verifica-se que uma boa parte do campo apresenta tendências reduzidas/nulas. Olhando, ainda assim, para as tendências mais expressivas pode-se verificar um aumento significativo em alguns pontos na região da Islândia durante o período de inverno, e uma diminuição (pontualmente significativa) no período de verão. Estas tendências não são verificadas no modelo ECHAM5. No norte do Canadá pode-se verificar uma tendência negativa durante o inverno, que pontualmente mostra ter significado estatístico. Esta tendência, no entanto, não é tão expressiva nas reanálises NCEP I.

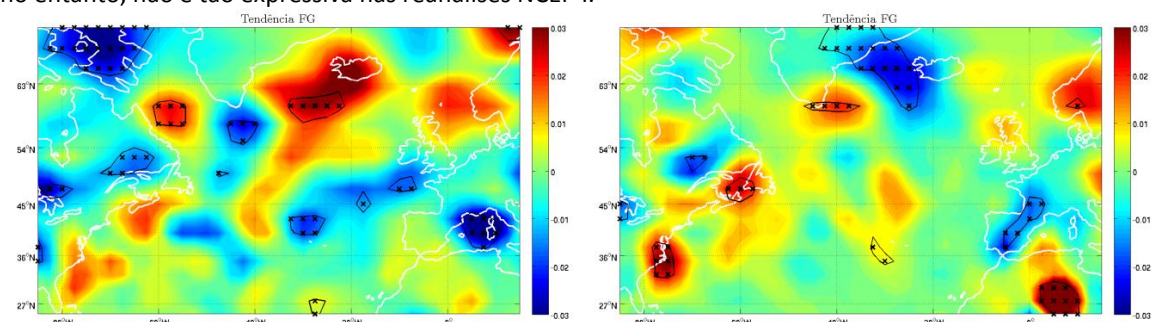


Fig.38 – Tendência da ciclogénese ($^{\circ} \text{lat}^{-2} \text{dia}^{-1} \text{ano}^{-1}$) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Reanálises ERA40. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.

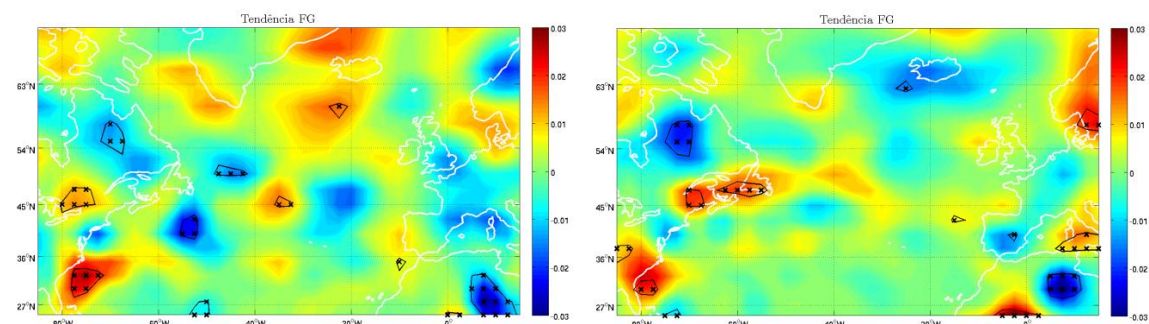


Fig.39 – Tendência da ciclogénese ($^{\circ}\text{lat}^{-2}\text{dia}^{-1}\text{ano}^{-1}$) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Reanálises NCEP I Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.

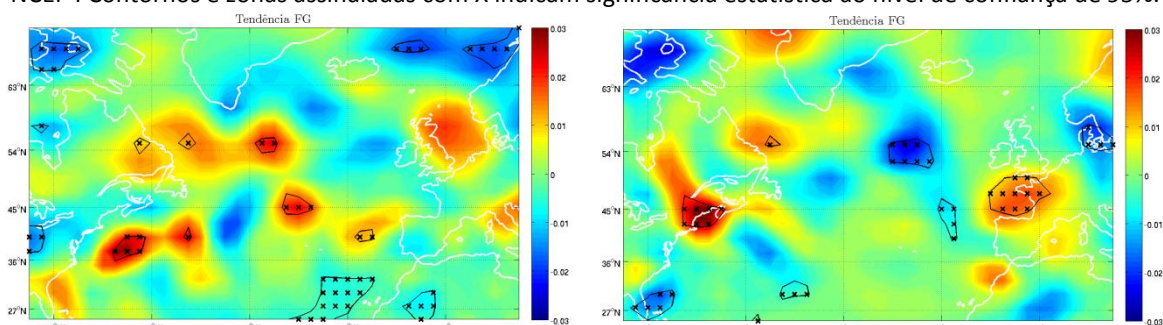


Fig.40 – Tendência da ciclogénese ($^{\circ}\text{lat}^{-2}\text{dia}^{-1}\text{ano}^{-1}$) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Modelo ECHAM5. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.

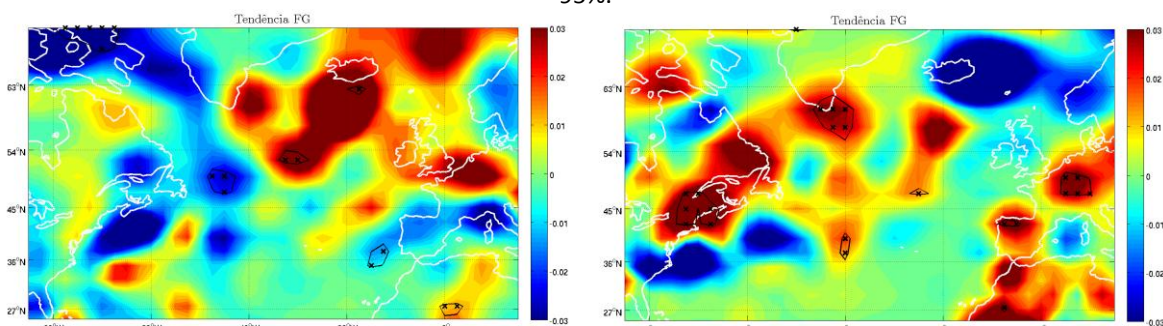


Fig.41 – Tendência da ciclogénese ($^{\circ}\text{lat}^{-2}\text{dia}^{-1}\text{ano}^{-1}$) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Modelo CCSM3. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.

Note-se, ainda, a oeste/noroeste da Península Escandinávia uma tendência para o aumento do número de ciclogénese no período de verão, não mostrando, contudo, grande significado estatístico. O modelo CCSM3 não mostra esta tendência, verificando-se, no entanto, uma tendência positiva e com significado estatístico nas regiões da Península Ibérica e Europa central.

Ciclólise (FL):

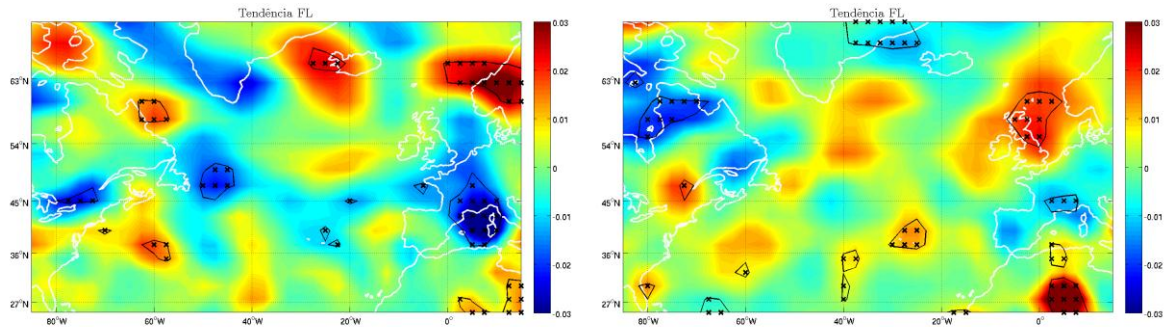


Fig.42 – Tendência da ciclólise ($^{\circ} \text{lat}^2 \text{dia}^{-1} \text{ano}^{-1}$) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Reanálises ERA40. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.

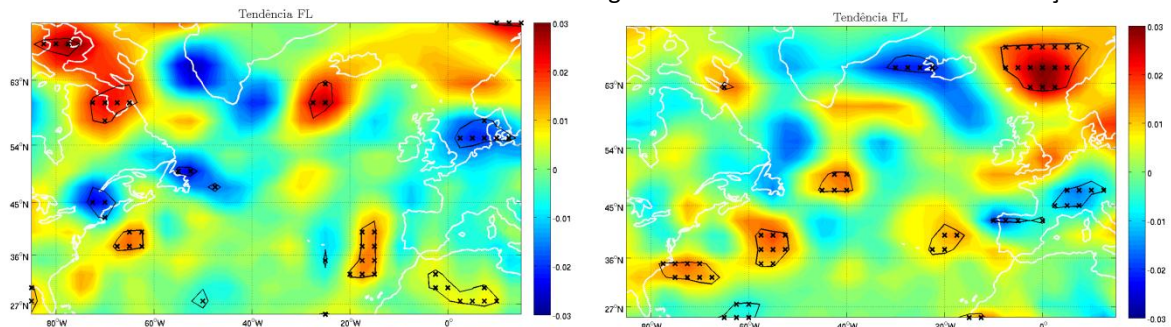


Fig.43 – Tendência da ciclólise ($^{\circ} \text{lat}^2 \text{dia}^{-1} \text{ano}^{-1}$) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Reanálises NCEP I. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.

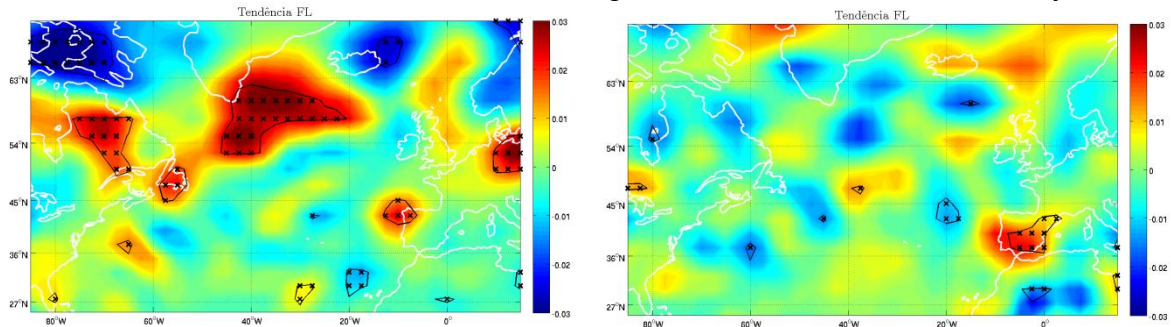


Fig.44 – Tendência da ciclólise ($^{\circ} \text{lat}^2 \text{dia}^{-1} \text{ano}^{-1}$) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Modelo ECHAM5. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.

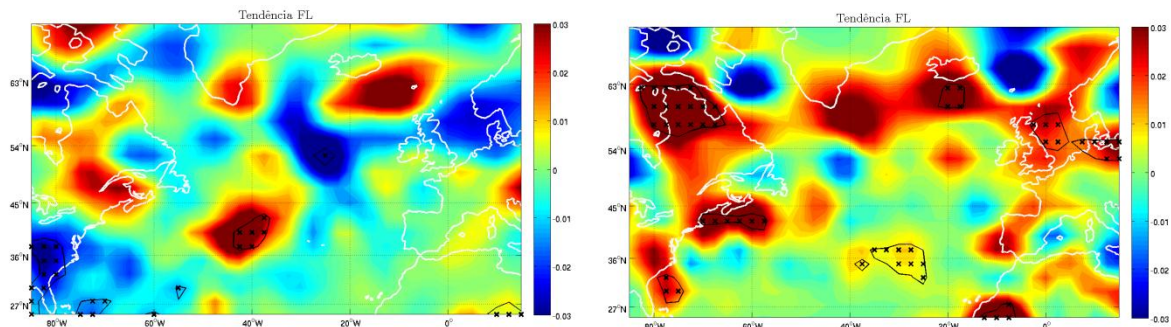


Fig.45 – Tendência da ciclólise ($^{\circ} \text{lat}^2 \text{dia}^{-1} \text{ano}^{-1}$) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Modelo CCSM3. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.

Olhando à tendência verificada nas ciclólises não se verificam tendências consistentes entre os 4 conjuntos de dados. Ainda assim, no período de inverno destacam-se as tendências negativas verificadas nas reanálises ERA40 junto à Córsega e sul de França, e o aumento junto da Península Escandinávia. Estas tendências mostram-se estatisticamente significativas, embora não sejam visíveis nos restantes 3 conjuntos de dados. Uma tendência significativamente positiva é, também, verificada entre o nordeste do Canadá e o sudoeste da Islândia, não sendo contudo visível nos outros conjuntos de dados. O período de verão mostra sobretudo tendências reduzidas/nulas. Porém, o modelo CCSM3 mostra um aumento em toda a costa leste da América do Norte e entre as latitudes 54°N e 65°N.

Número total de tempestades (TN):

Os gráficos 44 a 47 mostram as tendências verificadas no número de ocorrências de tempestades. Os dados ERA40 mostram sobretudo uma tendência para a diminuição do número de ciclones durante o inverno, mostrando um aumento sobre o oceano Atlântico durante o período de verão. Esta tendência sobre o oceano Atlântico pode ser verificada nas reanálises NCEP I, embora com menor expressividade.

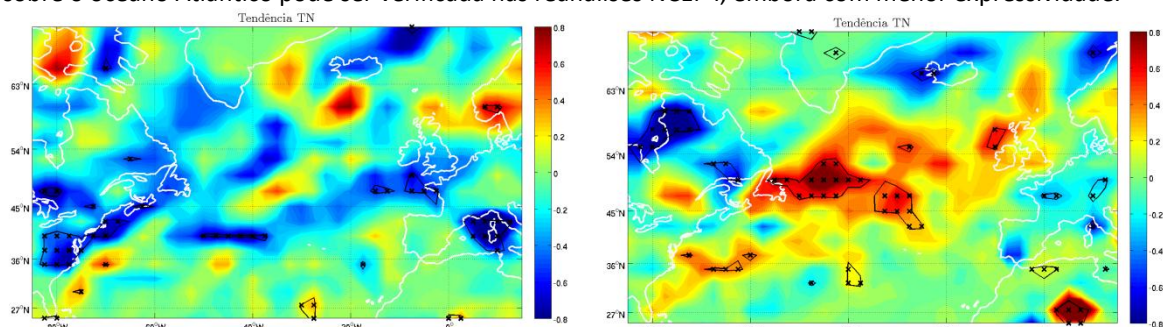


Fig.46 – Tendência do número total de tempestades (ano^{-1}) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Reanálises ERA40. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.

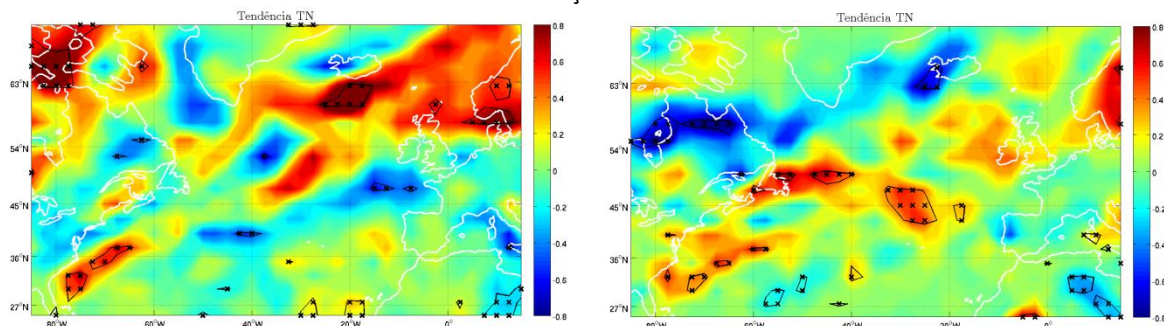


Fig.47 – Tendência do número total de tempestades (ano^{-1}) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Reanálises NCEP I. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.

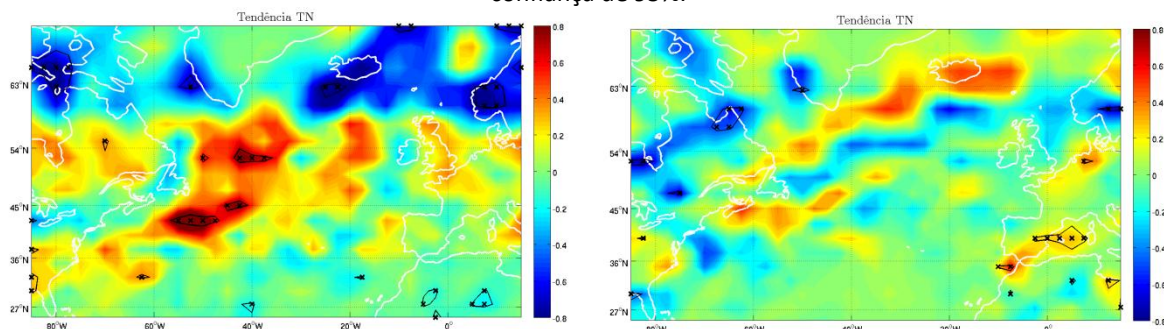


Fig.48 – Tendência do número total de tempestades (ano^{-1}) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Modelo ECHAM5. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.

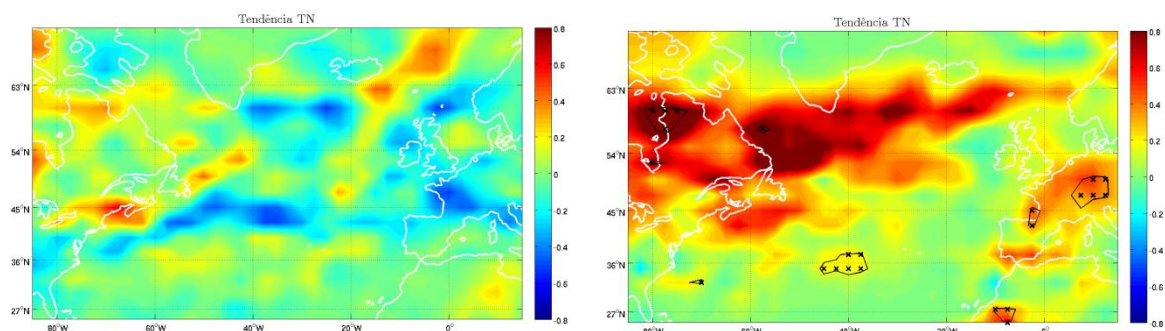


Fig.49 – Tendência do número total de tempestades (ano^{-1}) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Modelo CCSM3. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.

Os resultados NCEP I mostram, ainda, uma tendência negativa no nordeste do Canada. Já no período de inverno pode-se verificar uma tendência positiva no aumento do número de ciclones nas latitudes mais elevadas. No que respeita aos dois modelos, enquanto o modelo CCSM3 mostra uma clara tendência para o aumento do número de tempestades durante o período de verão em grande parte do domínio, já o modelo ECHAM5 mostra no inverno uma tendência para a diminuição de tempestades nas regiões subpolares, e um aumento nas latitudes médias, enquanto no verão as tendências são maioritariamente nulas.

Densidade de sistemas (SD):

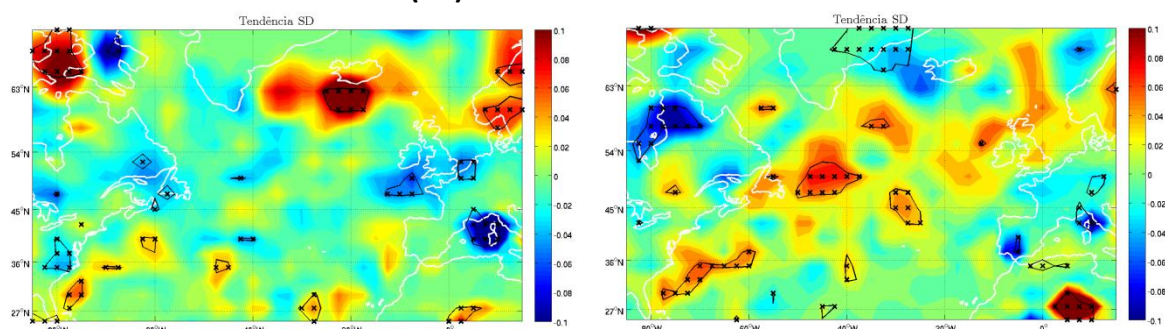


Fig.50 – Tendência da densidade de sistemas (ano^{-1}) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Reanálises ERA40. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.

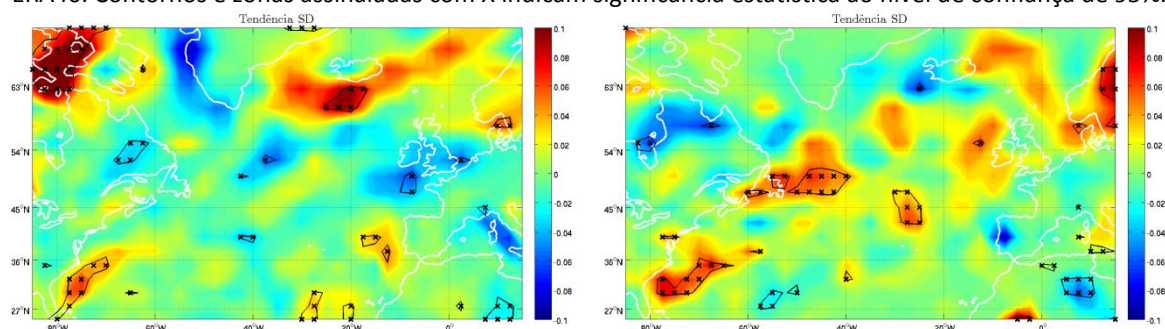


Fig.51 – Tendência da densidade de sistemas (ano^{-1}) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Reanálises NCEP I. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.

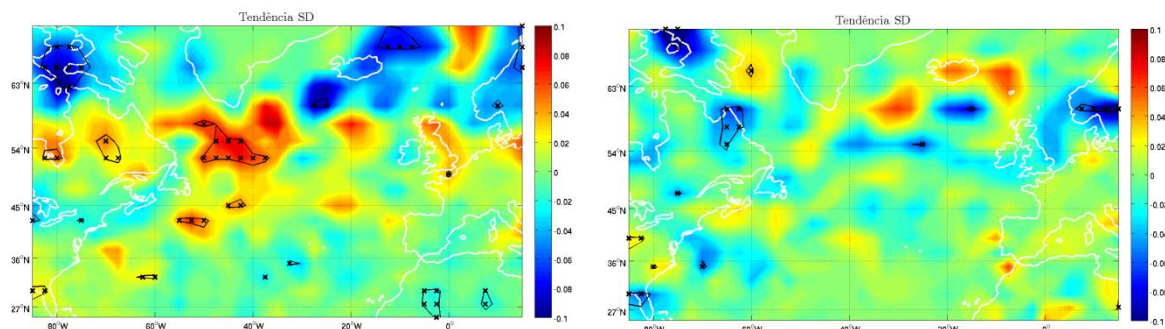


Fig.52 – Tendência da densidade de sistemas (ano^{-1}) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Modelo ECHAM5. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.

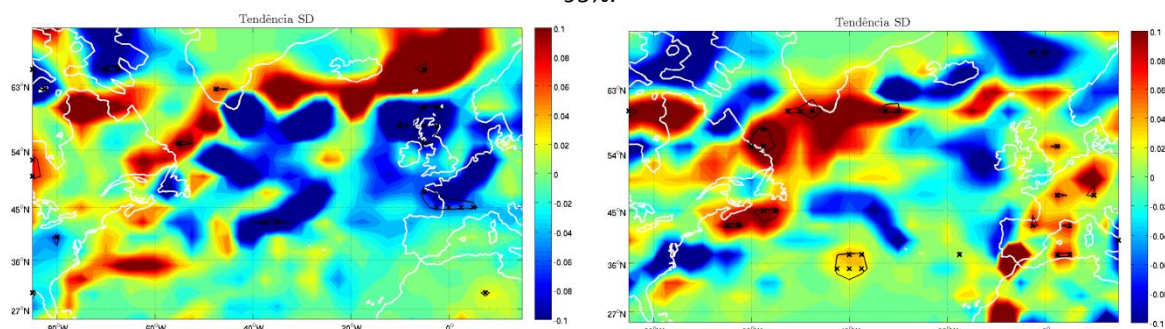


Fig.53 – Tendência da densidade de sistemas (ano^{-1}) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Modelo CCSM3. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.

As tendências verificadas na densidade de sistemas mostram-se reduzidas/nulas na grande maioria do domínio e nos 4 conjuntos de dados. Porém, algumas observações podem ser registadas. No período de inverno, nas latitudes elevadas, especialmente junto da Islândia, Gronelândia, Península Escandinávia e norte do Canadá verificam-se tendências positivas. Tendências negativas são verificadas sobre o oceano Atlântico nas regiões entre os 35°N e os 50°N . O modelo ECHAM5 mostra uma situação inversa a esta. No período de verão, verifica-se uma tendência positiva nas latitudes médias, aproximadamente entre os 35°N e os 50°N . Uma vez mais o modelo ECHAM5 não mostra este padrão, sendo que as tendências se apresentam maioritariamente nulas em todo o domínio. Diga-se, ainda, que estas tendências referidas raramente apresentam significado estatístico.

Profundidade (DP):

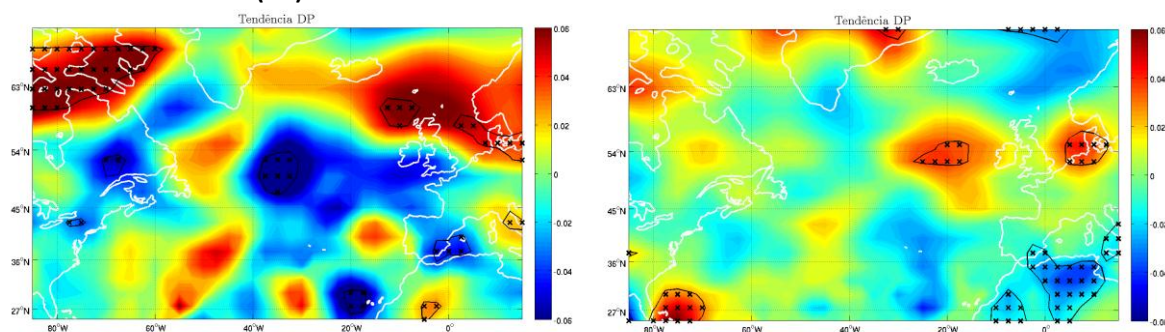


Fig.54 – Tendência da profundidade (hPa ano^{-1}) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Reanálises ERA40. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.

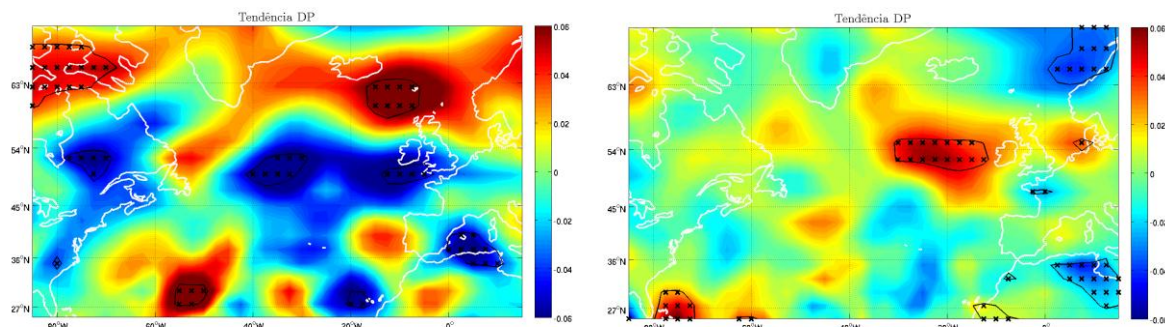


Fig.55 – Tendência da profundidade (hPa ano^{-1}) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Reanálises NCEP I. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.

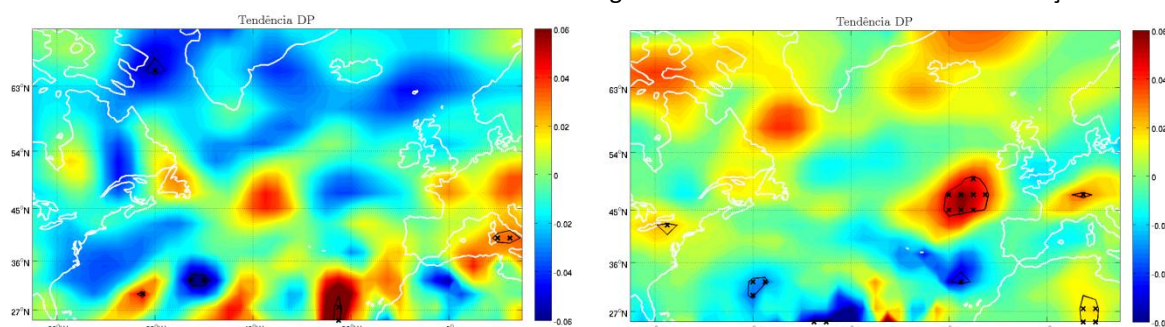


Fig.56 – Tendência da profundidade (hPa ano^{-1}) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Modelo ECHAM5. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.

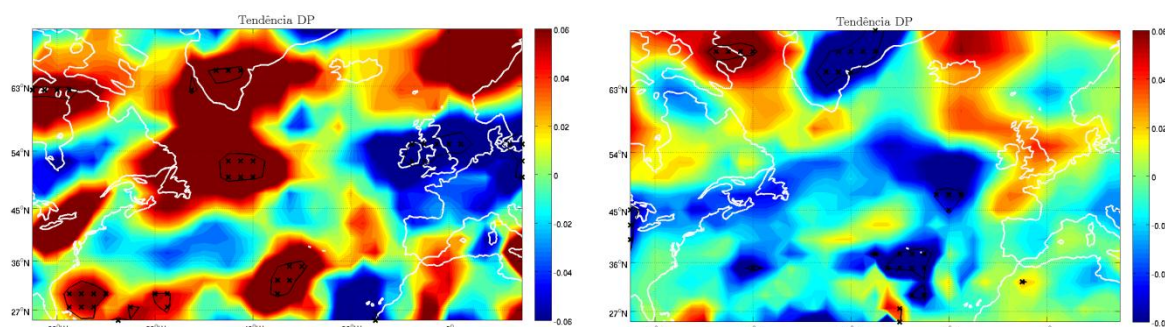


Fig.57 – Tendência da profundidade (hPa ano^{-1}) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Modelo CCSM3. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.

As figuras 54 a 57 mostram os campos da tendência da profundidade dos ciclones. Para o período de inverno verifica-se uma tendência para o aumento da profundidade dos ciclones nas latitudes acima dos 60°N . Este aumento mostra-se estatisticamente significativo no norte do Canadá (0.04 a 0.06 hPa/ano) e a sudeste da Islândia (0.04 a 0.06 hPa/ano). O modelo CCSM3 mostra esta tendência positiva em latitudes inferiores, junto da costa leste do oceano Atlântico, sendo que é maioritariamente não significativo. O modelo ECHAM5 mostra uma tendência contrária aos 3 restantes conjuntos de dados, mostrando uma tendência negativa nas latitudes mais elevadas, e tendências ligeiramente positivas nas latitudes mais baixas, em especial na região do arquipélago da Madeira e Mediterrâneo. No período de verão as reanálises ERA40 e NCEP I mostram alguma concordância, mostrando tendências positivas e estatisticamente significativas junto das Ilhas Britânicas, e tendências negativas igualmente significativas no norte da Península Escandinávia e no norte de África. No que respeita aos modelos, um padrão semelhante ao verificado nas reanálises pode ser observado no modelo ECHAM5, enquanto o modelo CCSM3 mostra um padrão ligeiramente diferente. Neste último modelo uma tendência negativa pode-se notar na maior parte

do domínio, sendo mais expressiva e significativamente positiva na região central do oceano Atlântico e Gronelândia.

Pressão no centro (PC):

As imagens 58 a 61 mostram os campos da tendência da pressão no centro dos ciclones. Olhando aos resultados obtidos das duas reanálises pode verificar-se que no período de inverno os padrões são bastante semelhantes. Uma clara tendência para o aumento da pressão central dos ciclones pode ser verificada nas latitudes inferiores aos 55°N (0.1 a 0.2 hPa/ano). O teste de significância indica, no entanto, que esta tendência apenas é significativa em algumas regiões do norte de África e no nordeste do Canadá. É de notar também uma tendência negativa de aproximadamente 0.2 a 0.3 hPa/ano nas latitudes acima dos 55°N. Segundo as reanálises ERA40 esta tendência é estatisticamente significativa na Escandinávia e regiões subpolares do Canadá, enquanto os resultados obtidos com as reanálises NCEP I mostram significância estatística sobre a região da Islândia e também nas regiões subpolares do Canadá.

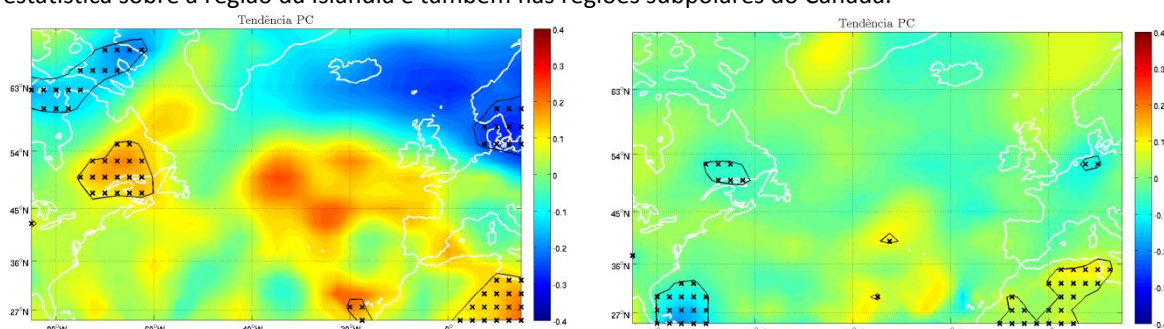


Fig.58 – Tendência da pressão no centro (hPa ano^{-1}) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Reanálises ERA40. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.

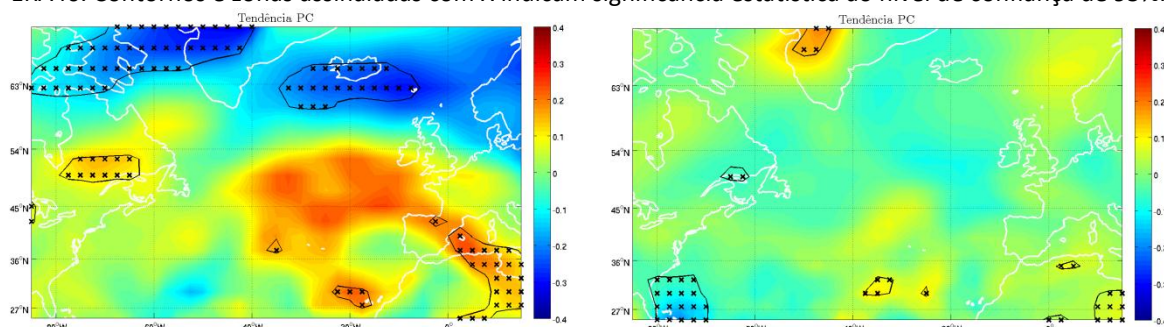


Fig.59 – Tendência da pressão no centro (hPa ano^{-1}) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Reanálises NCEP I. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.

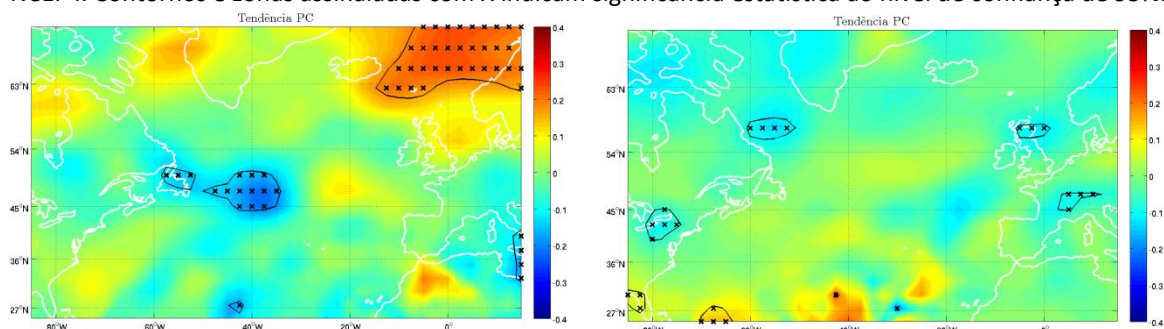


Fig.60 – Tendência da pressão no centro (hPa ano^{-1}) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Modelo ECHAM5. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.

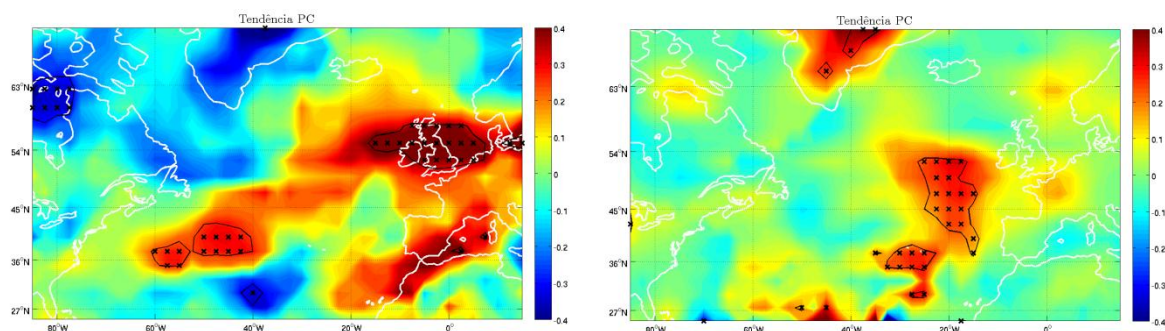


Fig.61 – Tendência da pressão no centro (hPa ano^{-1}) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Modelo CCSM3. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.

Quanto aos resultados dos modelos verifica-se que o que se aproxima mais dos padrões das reanálises é o modelo CCSM3, mostrando um aumento significativo sobre as Ilhas Britânicas e uma diminuição sem significância estatística sobre ao norte do Canadá. O modelo ECHAM5 mostra um aumento significativo da pressão central na Escandinávia e uma pequena região com uma tendência negativa a leste do Québec (Canada).

No período de verão observa-se que as tendências são mais reduzidas, apresentando-se quase nulas para as reanálises NCEP I e modelo ECHAM5. Os resultados das reanálises ERA40 mostram uma tendência para a diminuição significativa da pressão central no norte de África ($0.3 \text{ } 0.4 \text{ hPa/ano}$), e um aumento também significativo junto das Ilhas Britânicas (aproximadamente 0.4 hPa/ano). O modelo CCSM3 mostra alguns aumentos significativos na Gronelândia, no oceano Atlântico, a oeste das Ilhas Britânicas e Península Ibérica.

Raio (RO):

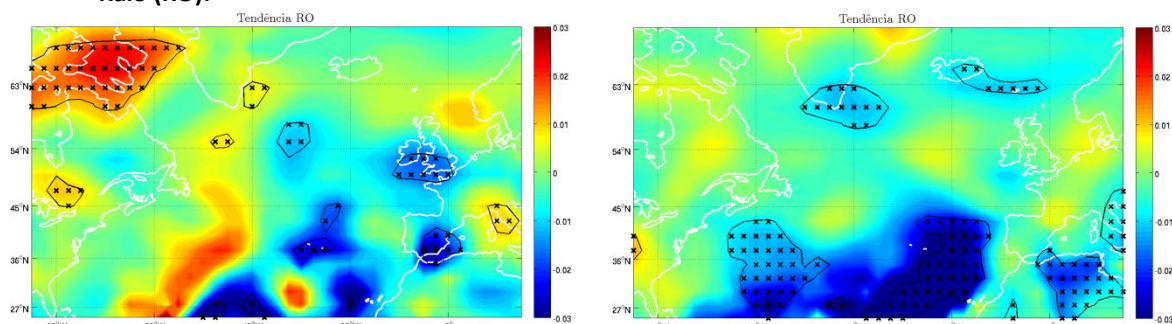


Fig.62 – Tendência do raio ($^{\circ} \text{ lat ano}^{-1}$) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Reanálises ERA40. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.

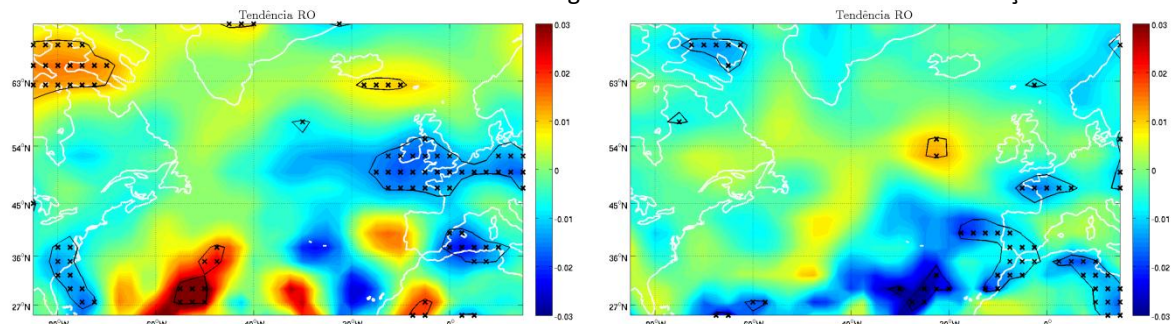


Fig.63 – Tendência do raio ($^{\circ} \text{ lat ano}^{-1}$) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Reanálises NCEP I. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.

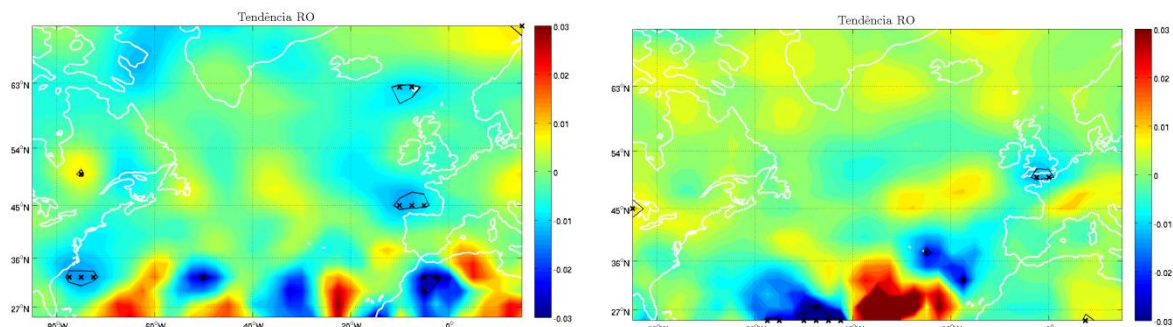


Fig.64 – Tendência do raio ($^{\circ}$ lat ano $^{-1}$) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Modelo ECHAM5. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.

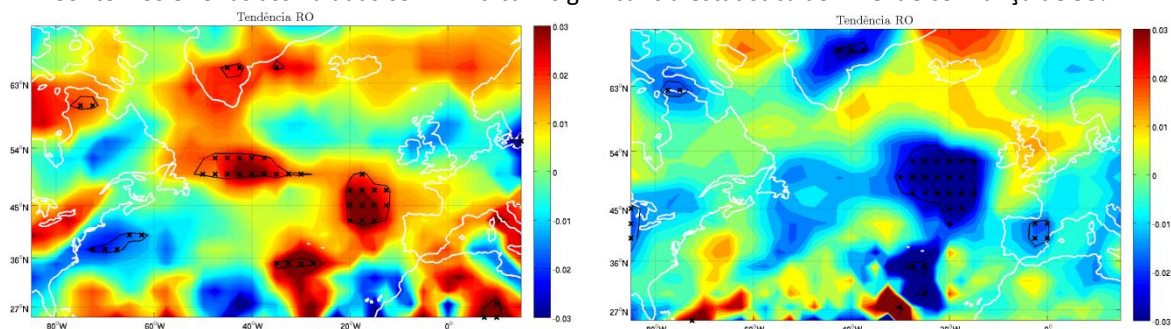


Fig.65 – Tendência do raio ($^{\circ}$ lat ano $^{-1}$) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Modelo CCSM3

Analisando as tendências do raio verifica-se que os padrões das reanálises apresentam-se bastante semelhantes, mostrando uma tendência para as depressões serem mais pequenas durante o período de verão em boa parte do domínio (0.01 a 0.03 $^{\circ}$ lat ano $^{-1}$). Esta tendência é mais expressiva e simultaneamente significativa nas reanálises ERA40 em latitudes inferiores a 40° N. No período de inverno esta tendência para a diminuição do raio das tempestades não se apresenta tão expressiva, verificando-se algumas regiões onde a tendência mostra um aumento do mesmo. Neste caso, destaca-se a região norte do Canada (com um aumento de 0.02 a 0.03 $^{\circ}$ lat ano $^{-1}$) onde tal aumento é estatisticamente significativo. Apurando os resultados obtidos dos modelos verifica-se que no caso do modelo ECHAM5 as tendências são muito reduzidas/nulas. Contudo, o modelo CCSM3 apresenta uma tendência para o aumento do raio durante o inverno em grande parte do domínio, enquanto no verão verifica-se uma tendência para as tempestades apresentarem um raio menor.

Intensidade (INT):

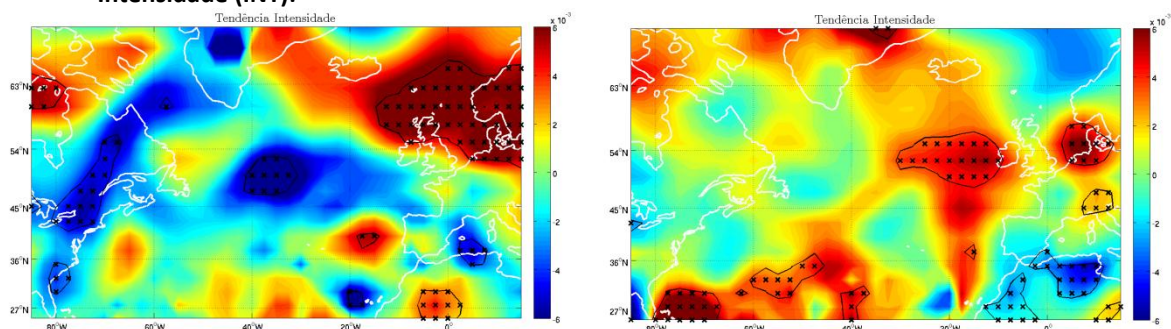


Fig.66 – Tendência da intensidade ($\text{hPa } ^{\circ}\text{lat}^2 \text{ano}^{-1}$) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Reanálises ERA40. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.

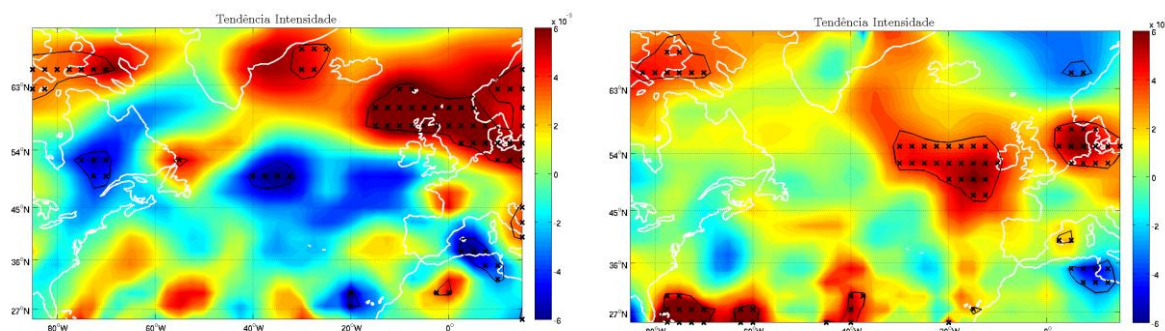


Fig.67 – Tendência da intensidade ($\text{hPa } ^\circ\text{lat}^{-2} \text{ ano}^{-1}$) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Reanálises NCEP I. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.

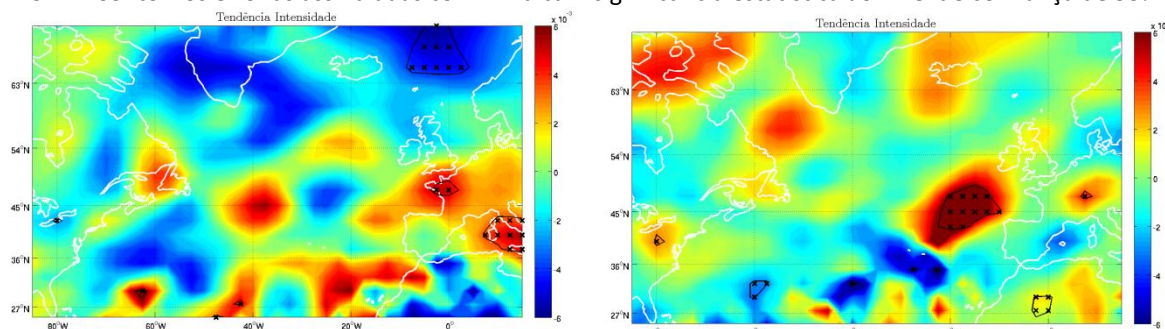


Fig.68 – Tendência da intensidade ($\text{hPa } ^\circ\text{lat}^{-2} \text{ ano}^{-1}$) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Modelo ECHAM5. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.

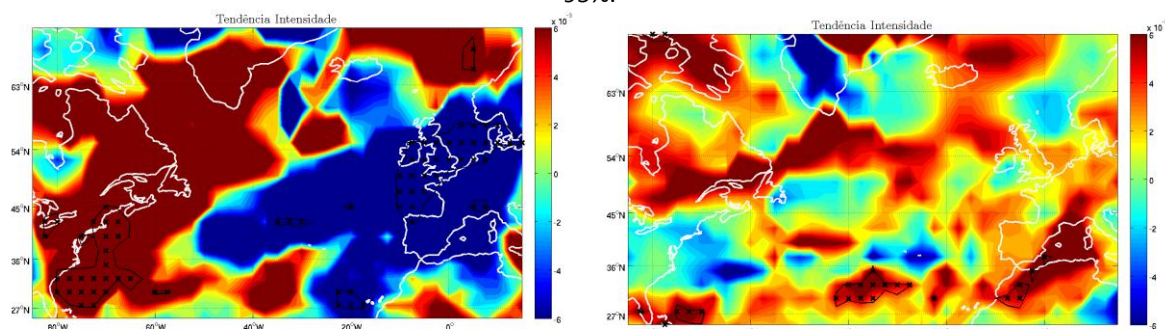


Fig.69 – Tendência da intensidade ($\text{hPa } ^\circ\text{lat}^{-2} \text{ ano}^{-1}$) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Modelo CCSM3. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.

As figuras 66 a 69 mostram a tendência da intensidade (laplaciano da pressão) ao longo dos 30 anos em estudo. Comparando as reanálises rapidamente se pode verificar que apresentam um padrão de tendências muito semelhante. No período de inverno verifica-se uma tendência para aumentar a intensidade dos ciclones numa região que se estende desde a Islândia até à Escandinávia ($0.006 \text{ hPa } ^\circ\text{lat}^{-2} \text{ ano}^{-1}$). Uma tendência positiva pode ser também encontrada no norte do Canadá (aproximadamente $0.004 \text{ hPa } ^\circ\text{lat}^{-2} \text{ ano}^{-1}$), sendo que estas duas tendências mostram ser, em grande parte, estatisticamente significativas. Por outro lado a costa leste da América do Norte e uma região situada a norte dos Açores mostram uma tendência para a diminuição da intensidade dos ciclones (com valores aproximados de $0.005 \text{ hPa } ^\circ\text{lat}^{-2} \text{ ano}^{-1}$), sendo esta em parte também estatisticamente significativa. No período de verão verifica-se que a tendência é positiva na maioria do domínio, indicando um aumento da intensidade das tempestades, sendo que é estatisticamente significativa a oeste das Ilhas Britânicas e a leste da Florida, aproximadamente entre os 80°W e os 40°W . Quanto aos modelos, pode-se verificar que estes não se aproximam muito dos padrões obtidos nas reanálises. Ainda assim, e à semelhança do verificado nas reanálises o modelo CCSM3 mostra para o período de verão uma tendência maioritariamente positiva da intensidade, embora apenas nas latitudes mais baixas se encontrem tendências com significado estatístico.

4.1.4. Conclusões:

Os resultados da análise feita para as estações intermédias, nomeadamente primavera e outono, não são apresentados por não diferirem dos obtidos para as duas restantes estações. No entanto, algumas diferenças pontuais podem ser referidas. Tipicamente a actividade ciclónica é máxima durante o período de inverno. A chegada dos meses de primavera leva a uma ligeira redução da mesma, sendo que esta redução torna-se mais visível durante os meses de verão, nomeadamente Junho, Julho e Agosto. O trimestre correspondente ao período de outono apresenta-se mais activo que o período de verão, embora ainda menos activo que o período de inverno. Assim, as estações da primavera e outono podem ser consideradas períodos de transição entre a época mais fértil em actividade ciclónica (o inverno) e a menos activa (verão). Comparando as duas estações de transição foi possível observar que nas latitudes aproximadamente acima dos 50°N o período de outono apresenta maior actividade ciclónica que o período da primavera, verificando-se o inverso nas latitudes inferiores a 50°N. Outro resultado importante verificado nas estações de transição prende-se com a tendência verificada para o aumento da intensidade dos ciclones numa vasta região ao largo da Península Ibérica apresentando, esta tendência, significado estatístico ao nível de confiança de 95% (figura 19-A).

Grande parte dos ciclones formam-se junto da costa leste Norte Americana, deslocando-se posteriormente sobre o oceano para nordeste onde, favorecidos pela boa disponibilidade de vapor de água que o oceano lhes fornece, se intensificam, enfraquecendo e dissipando-se finalmente nas altas latitudes próximas da Gronelândia ou da Península Escandinávia marcando, assim, a *storm track* desta região. As ciclogéneses são, ainda, favorecidas junto da Islândia, região alpina, nordeste da Península Escandinávia e no período de verão entre o sul da Península Ibérica e norte de África. Nesta última região verificam-se, ainda, máximos nos campos de ciclólise e número total de tempestades. Esta situação sugere que a actividade ciclónica verificada durante esta época do ano nesta região está ligada à formação de baixas térmicas, dado que estas se formam devido ao forte aquecimento superficial e o seu posicionamento é geralmente estacionário.

Como seria de esperar comparando o período de verão com o de inverno, verifica-se que a actividade ciclónica é significativamente superior durante os meses de inverno.

A análise dos campos do raio médio permitiu verificar que as depressões de maiores dimensões tendem a ocorrer sobre o oceano, tal como é referido em Rudeva et al. (2007), com dois máximos separados entre si pela região central do Atlântico (efeito mais visível nas reanálises ERA40), junto do arquipélago dos Açores. Possivelmente a este facto não é estranho o posicionamento do centro de altas pressões que é característico desta região, e que tenderá a enfraquecer os ciclones que ali chegam.

O estudo do desvio padrão permitiu tirar algumas conclusões sobre a variabilidade interanual. Pôde verificar-se que a variabilidade interanual máxima do número total de tempestades é obtida sobre os locais onde se verificam mais tempestades. Como referido acima, os ciclones apresentam caminhos típicos (*storm track*), e uma pequena variação deste caminho leva a variações significativas das ocorrências de ciclones nas vizinhanças do mesmo. Note-se, também, que as variações anuais da *storm track* estão muito interligadas com padrões de teleconexão, como o caso do El Niño ou NAO (Gulev et al., 2001). Boa parte do que é verificado na atmosfera é, também, determinado pelas condições oceânicas, podendo alguma da variabilidade encontrada ser devida a variações das condições superficiais do oceano, nomeadamente da temperatura.

Em boa parte das características estudadas a análise das tendências mostrou que estas são reduzidas e geralmente sem significado estatístico. Porém, em certos casos foi possível identificar alguns padrões de tendência importantes. Destaca-se a tendência para o aumento da intensidade no período de inverno no nordeste do Canada e numa vasta região compreendida entre a Islândia e Península Escandinávia. O teste de significância mostrou que esta tendência apresenta significado estatístico ao nível de confiança de 95%. Note-se, ainda, que este aumento pode ser corroborado pelas tendências verificadas nestas regiões para o aumento da profundidade dos ciclones e para a diminuição da pressão central dos mesmos. Recorde-se que resultados semelhantes foram encontrados por Wang et al (2006) e Gulev et al. (2001). O período de verão mostra também uma tendência para o aumentar da intensidade dos ciclones em grande parte do domínio, sendo que estas tendências obtêm significado estatístico em latitudes mais

baixas por comparação ao verificado no período de inverno. As regiões do Atlântico a leste da Florida, a oeste das Ilhas Britânicas conjuntamente com a região do Mar do Norte são as que mais se destacam. Outra das tendências verificadas e que não pode ser ignorada prende-se com a tendência para o diminuir do raio dos ciclones especialmente no período de verão. Esta tendência apenas encontra oposição no norte do Canada, onde a tendência é para um aumento do tamanho dos ciclones.

Observando o número total de tempestades e densidade de sistemas, poucas tendências são visíveis, embora uma tendência para o aumento de sistemas junto da Islândia, Escandinávia e norte do Canadá possa ser notada. Estas tendências, contudo, raramente se apresentam com significado estatístico, não sendo claramente visível o deslocamento para norte da *storm track* referido por Wang et al. (2006) e Gulev et al. (2001). No entanto, refira-se que Wang et al. (2006) avançou no seu trabalho que este efeito é mais visível em reanálises NCEP e tal, também, pode ser corroborado neste trabalho.

Um dos objectos deste trabalho centrou-se em comparar os dois conjuntos de reanálises em estudo. Em termos gerais estas apresentaram elevada concordância, embora em casos pontuais algumas diferenças possam ser enumeradas. Uma dessas diferenças verifica-se no número total de tempestades geradas. As reanálises NCEP I mostram uma média superior a 100 ciclones por inverno entre a Islândia e a Gronelândia, estando este valor bem acima do verificado nas reanálises ERA40. Outra das diferenças centra-se no tamanho dos ciclones. As reanálises NCEP I tendem a produzir sistemas maiores que as ERA40. Em termos de intensidades estas tendem a ser ligeiramente superiores em reanálises ERA40.

Em relação aos modelos verificou-se que estes reproduziram de forma satisfatória os padrões obtidos com dados de reanálises. Os locais preferenciais para a ciclogénese, a *storm track* e os pontos de ciclólise foram bem definidos pelos dois modelos. Ainda assim, o modelo CCSM3 aparenta ser o que mais se desvia em relação aos resultados das reanálises, podendo observar-se uma tendência para produzir menos sistemas, e estes apresentarem pressão central mais reduzida e menor tamanho. Ao invés, o modelo ECHAM5 aproxima-se mais dos resultados das reanálises, diferindo apenas de forma mais visível no tamanho das depressões, produzindo sistemas menores. Porém, considera-se que os resultados apresentam um nível de concordância suficiente que permite utilizar estes modelos como ferramenta de estudo para um clima futuro.

A actividade ciclónica no Atlântico, na região de Portugal Continental, é fraca. A ciclogénese e ciclólise são reduzidas, ocorrendo em média aproximadamente 20 a 30 ciclones por trimestre. No período de verão estes parecem estar geralmente relacionados com a formação de baixas térmicas. Os ciclones que atingem esta região apresentam geralmente baixa profundidade (4 a 5 hPa no inverno e 2 a 3 hPa no verão), pressões centrais de aproximadamente 1005 a 1010 hPa no inverno e próximas de 1015 no verão, raios médios de cerca de cerca de 5° a 6° de latitude no inverno e 4° de latitude no verão. Em termos de intensidade a região de Portugal continental apresenta valores do laplaciano da pressão em torno de 0.8 hPa (° lat⁻²) no inverno e 0.5 hPa (° lat⁻²) no verão observando-se, ainda, que esta é uma das zonas onde a variabilidade interanual da intensidade é superior. As tendências verificadas nesta região mostram-se geralmente reduzidas/nulas e sem significado estatístico. No entanto, observa-se uma tendência para a diminuição do raio dos ciclones durante o verão sobre Portugal Continental (NCEP I) ou ao largo da referida região (ERA40).

As regiões insulares, nomeadamente a Madeira e os Açores, apresentam resultados semelhantes aos encontrados em Portugal Continental. Contudo, e devido ao facto de estes arquipélagos se posicionarem em pleno oceano, os ciclones que ocorrem nestas regiões apresentam uma dimensão superior aos observados em Portugal Continental, com valores a rondar os 5.2° a 5.6° de latitude no inverno e 4.6° a 5° de latitude no verão. Observando os campos das tendências podemos verificar que a norte dos Açores na época de verão existe uma propensão para ocorrerem mais ciclones (0.4 a 0.6 ciclones/ano), observando-se no mesmo período uma tendência para a diminuição do seu raio em aproximadamente 0.02 a 0.03° de latitude/ano nos dois arquipélagos. Estes resultados apresentam, também, significado estatístico ao nível de confiança de 95%. Uma tendência semelhante para a diminuição do tamanho dos ciclones pode ser identificada em ambos os arquipélagos no período de inverno, sendo que esta apresenta-se mais expressiva e com significado estatístico na região dos Açores em dados de reanálise ERA40.

4.2. Clima futuro (2071-2100):

4.2.1. – Média:

Ciclogénese (FG):

As imagens 70 e 71 mostram os campos médios da ciclogénese no período 2071-2100. Note-se que os dois modelos mostram elevada concordância quanto aos locais onde a ciclogénese é favorecida, mostrando máximos junto da costa leste da América do Norte (ambas as estações do ano), junto da região alpina (ambas as estações), numa vasta região entre o leste da Gronelândia e a ocidente da Escandinávia (apenas inverno) e, ainda, um máximo no período de verão entre o sul da Península Ibérica e o norte de África.

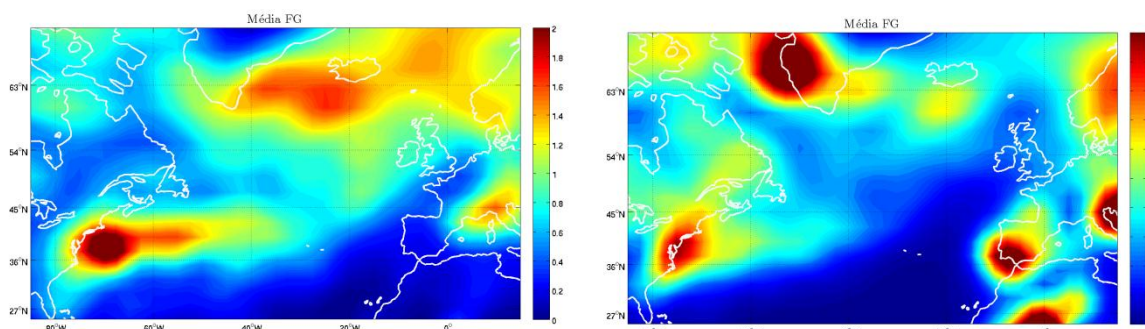


Fig.70 – Ciclogénese ($^{\circ} \text{lat}^{-2} \text{dia}^{-1}$) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Modelo ECHAM5.

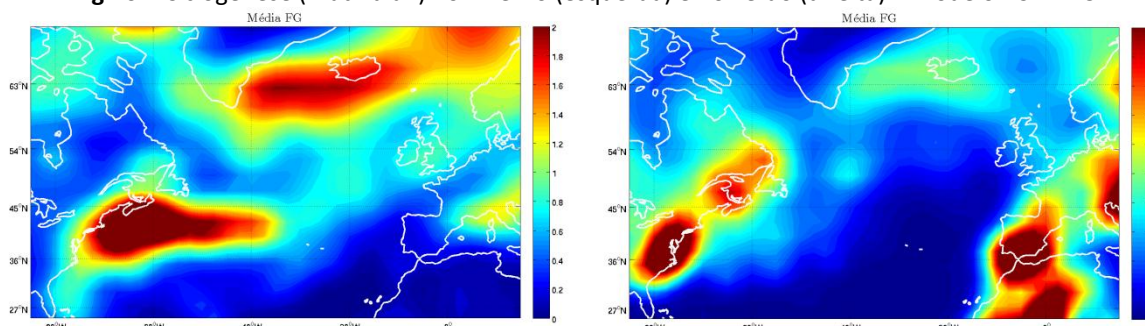


Fig.71 – Ciclogénese ($^{\circ} \text{lat}^{-2} \text{dia}^{-1}$) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Modelo CCSM3.

Olhando às médias obtidas no período 1971-2000 pode-se verificar que as zonas preferenciais para a formação de tempestades não sofreram alterações de vulto, tanto ao nível do seu posicionamento, como ao nível dos máximos verificados.

Ciclólise (FL):

Olhando aos campos médios da ciclólise verifica-se uma grande concordância entre os dois modelos. As latitudes mais elevadas do domínio, em torno da Gronelândia, mostram-se como o local preferencial para as tempestades se dissiparem. No período de verão a costa leste da América do Norte mostra-se como um dos pontos, também, favoráveis para ciclólises (mais visível no modelo CCSM3). Refira-se, ainda, a presença de um máximo junto da Península Ibérica e norte de África no período de verão. Estes resultados mostram-se bastante próximos dos verificados no período 1971-2000.

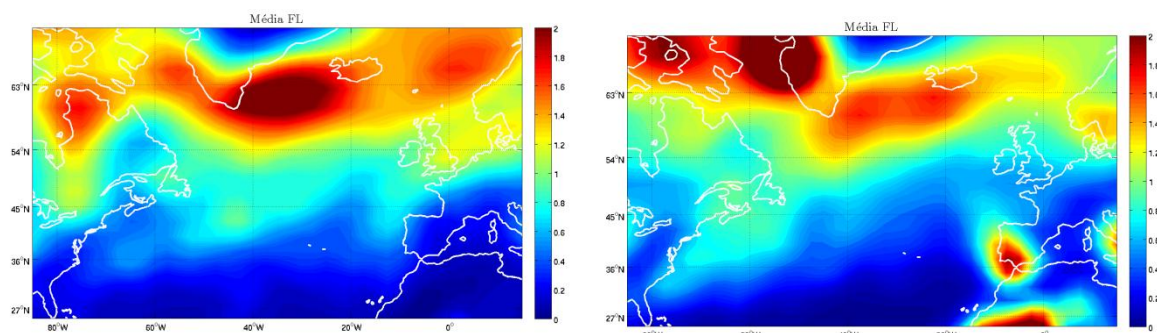


Fig.72 – Ciclólise ($^{\circ} \text{lat}^{-2} \text{dia}^{-1}$) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Modelo ECHAM5.

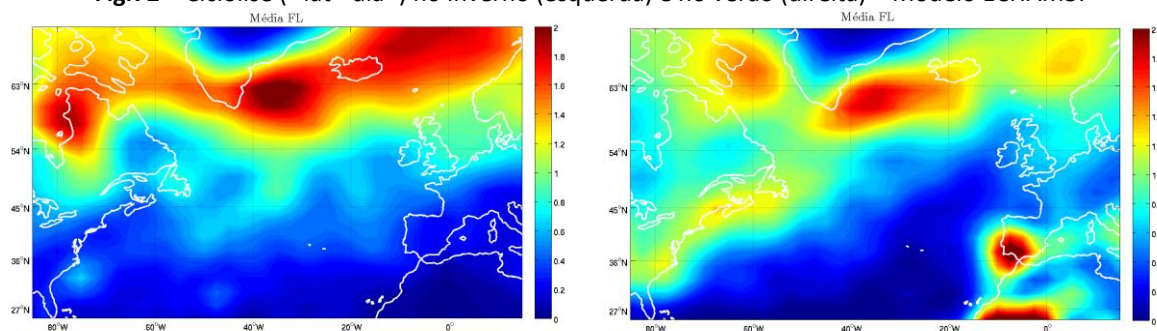


Fig.73 – Ciclólise ($^{\circ} \text{lat}^{-2} \text{dia}^{-1}$) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Modelo CCSM3.

Número total de tempestades (TN):

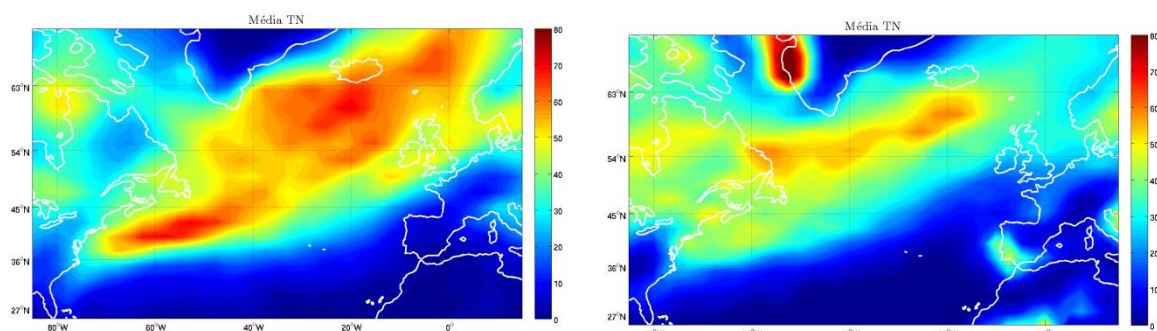


Fig.74 – Número total de tempestades no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Modelo ECHAM5.

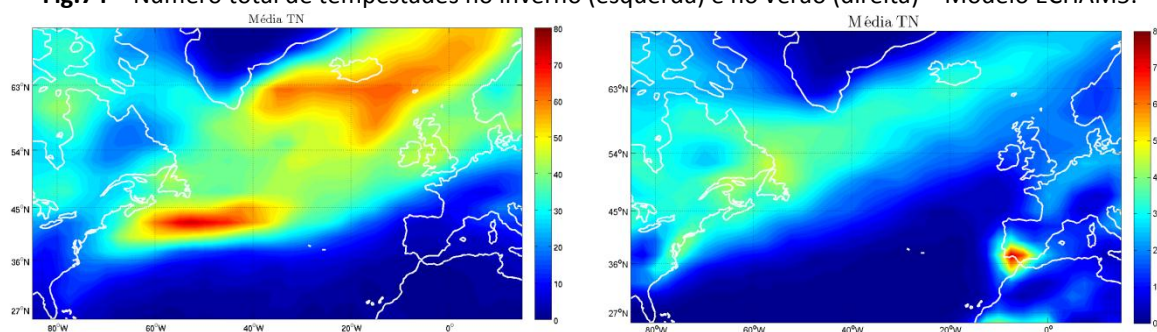


Fig.75 – Número total de tempestades no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Modelo CCSM3.

Analisando o número médio do total de tempestades verifica-se que, à semelhança do apurado para o clima actual, o maior número de tempestades tende a ocorrer entre o norte/nordeste da costa Norte

Americana, sul da Islândia, norte das Ilhas Britânicas e Península Escandinávia. Os dois modelos mostram elevada concordância observando-se, também, uma diminuição do número de ciclones no verão.

Densidade de sistemas (SD):

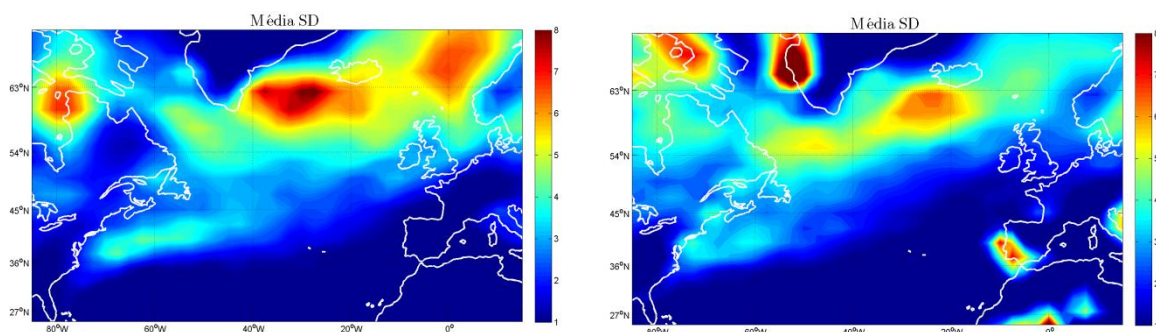


Fig.76 – Densidade de sistemas (número médio por $10^3 \text{ }^\circ \text{ lat}^2$) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Modelo ECHAM5.

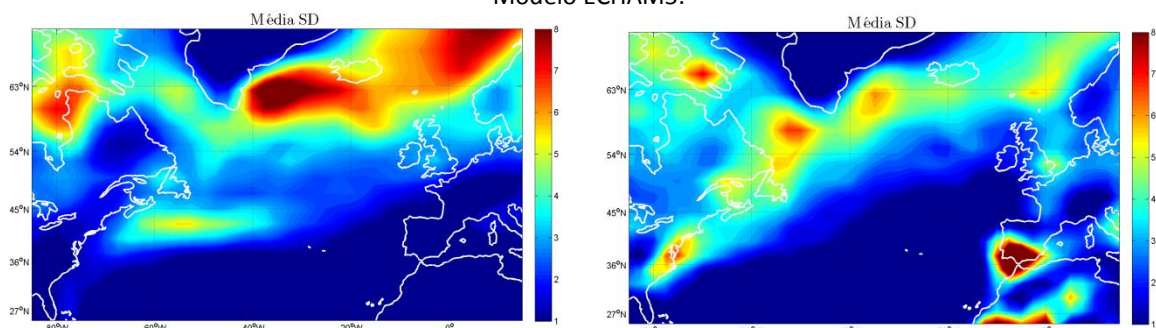


Fig.77 – Densidade de sistemas (número médio por $10^3 \text{ }^\circ \text{ lat}^2$) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Modelo CCSM3

As figuras referentes à densidade média de sistemas por grau de latitude quadrado mostram que as densidades superiores tendem a situar-se nas altas latitudes em torno da Gronelândia, com um máximo a surgir no verão na região da Península Ibérica e no norte de África. Os modelos mostram, uma vez mais, elevada concordância nos padrões obtidos.

Fazendo uma comparação com os resultados obtidos para o clima actual, pode-se observar que não se verificam alterações significativas.

Profundidade (DP):

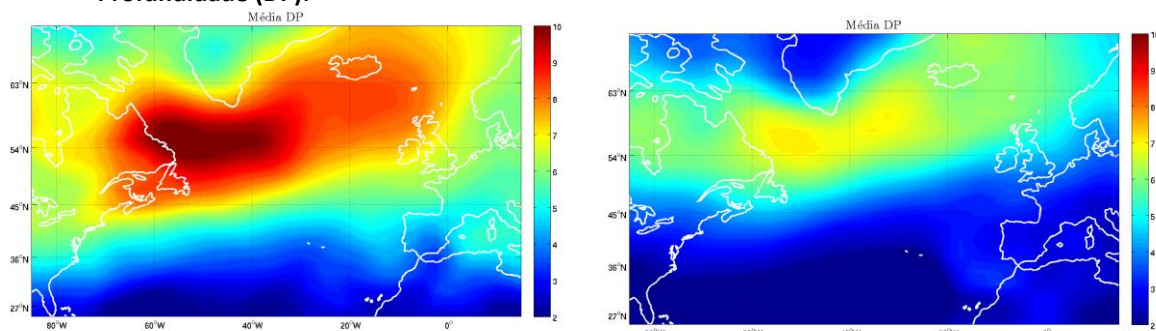


Fig.78 – Profundidade (hPa) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Modelo ECHAM5.

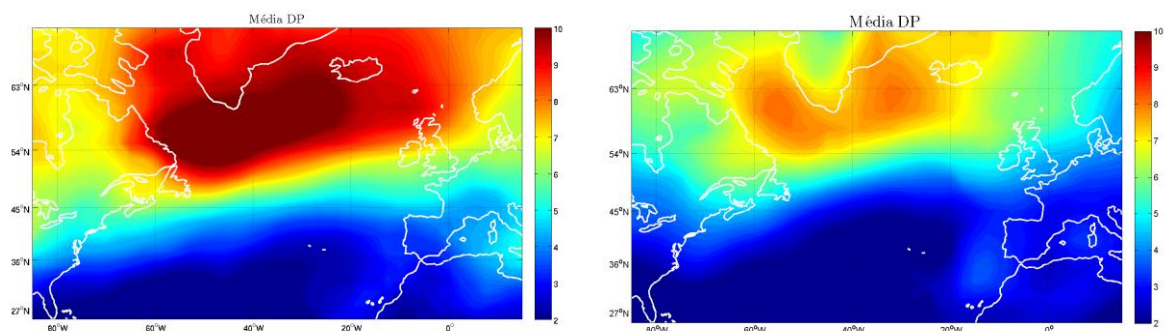


Fig.79 – Profundidade (hPa) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Modelo CCSM3.

Observando as médias de profundidade dos dois modelos pode verificar-se que as depressões mais profundas ocorrem nas latitudes mais elevadas (rondando os 8 a 10 hPa), especialmente acima dos 45°N. O período de verão apresenta menores valores médios de profundidade, com máximos a rondar os 7 a 8 hPa. Ambos os modelos mostram resultados semelhantes, sendo, igualmente, análogos aos apresentados para o período 1971-2000.

Pressão no centro (PC):

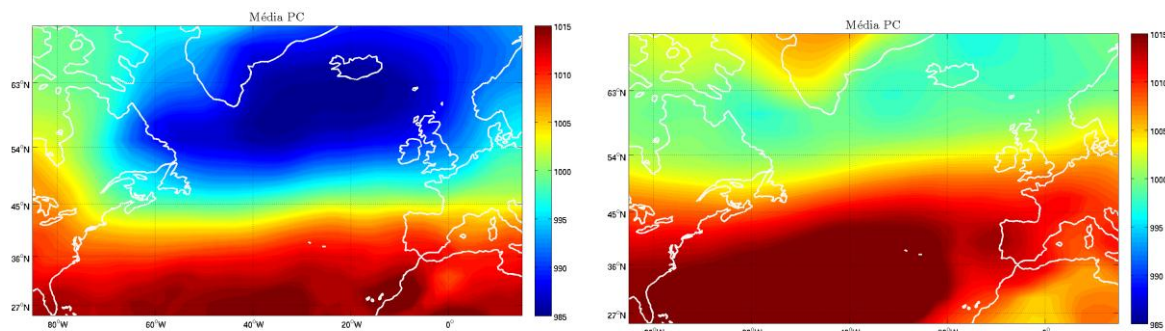


Fig.80 – Pressão no centro (hPa) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Modelo ECHAM5.

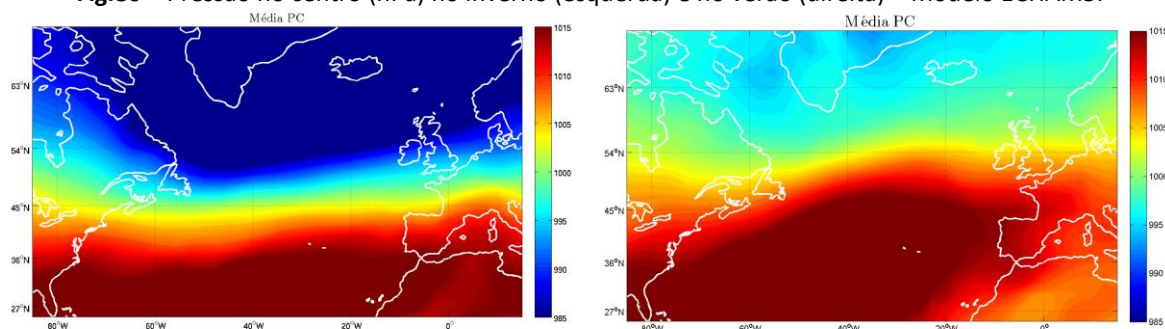


Fig.81 – Pressão no centro (hPa) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Modelo CCSM3.

Os resultados da média da pressão central das tempestades mostram que tal como no clima actual, as tempestades com menores pressões centrais ocorrem nas latitudes mais elevadas. Também, como o verificado no período 1971-2000, o modelo CCSM3 tende a produzir tempestades com pressões centrais menores a norte e superiores a sul.

Raio (RO):

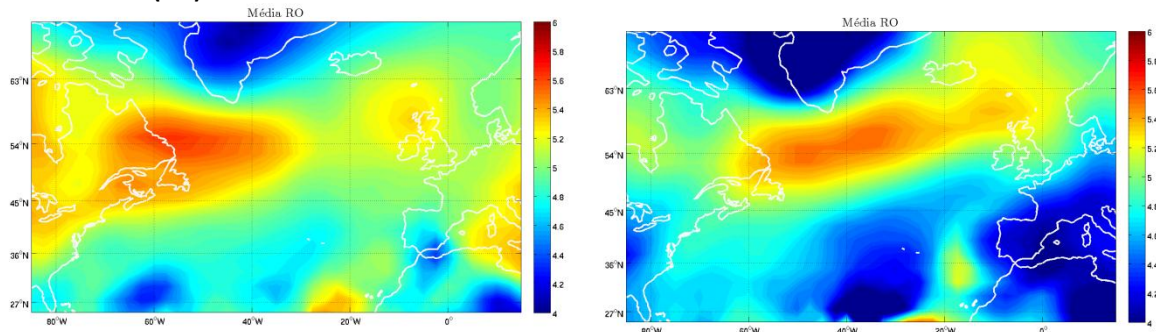


Fig.82 – Raio ($^{\circ}$ lat) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Modelo ECHAM5.

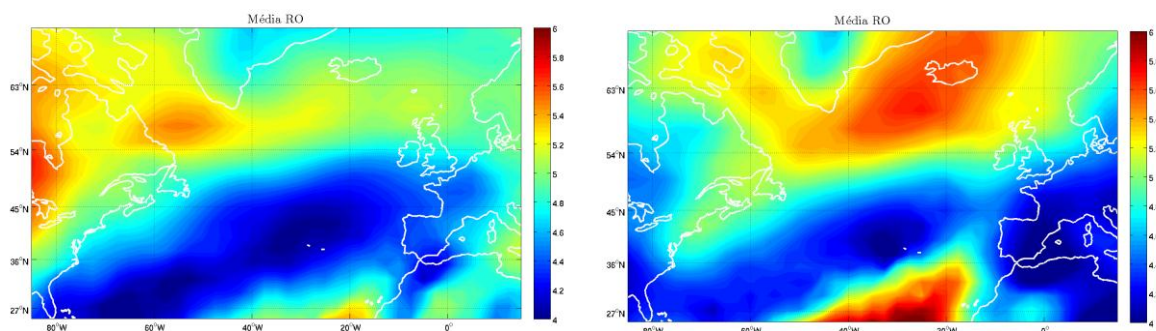


Fig.83 – Raio ($^{\circ}$ lat) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Modelo CCSM3.

Nos resultados obtidos para a média do raio pode-se verificar que as tempestades de maior dimensão tendem a ocorrer nas latitudes mais elevadas (norte do Canadá, sul da Gronelândia e Islândia). Por oposição, as tempestades mais pequenas tendem a ocorrer nas latitudes mais baixas. O contraste entre oceano e terra parece ser mais visível no período de verão. Os modelos mostram uma concordância satisfatória diferindo, apenas, no período de inverno entre o leste da Florida e a região dos Açores. Estes resultados mostram-se semelhantes aos obtidos no clima actual, no entanto, recorde-se que os resultados verificados nos modelos para o clima actual diferiam em parte ao que se obteve para as reanálises.

Intensidade (INT):

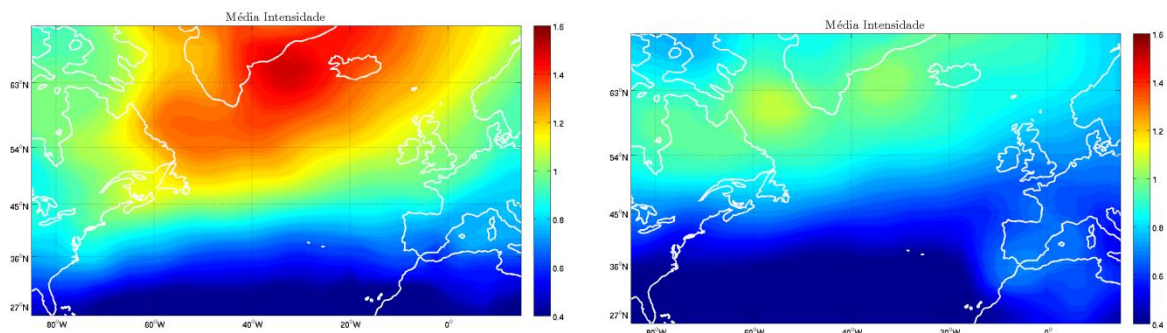


Fig.84 – Intensidade ($\text{hPa } (^{\circ} \text{ lat})^{-2}$) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Modelo ECHAM5.

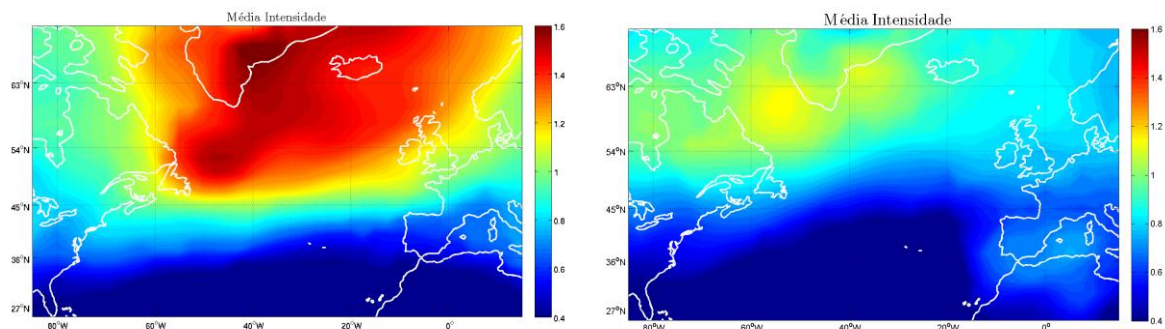


Fig.85 – Intensidade ($\text{hPa } (^\circ \text{ lat})^{-2}$) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Modelo CCSM3.

Quanto à intensidade pode-se averiguar que a semelhança do verificado no clima actual, tempestades mais intensas tendem a ocorrer nas latitudes mais elevadas, preferencialmente sobre o oceano, Gronelândia e Islândia (valores de aproximadamente 1.4 a $1.6 \text{ hPa } (^\circ \text{ lat})^{-2}$). Como seria de esperar, o período de verão apresenta uma redução assinalável da intensidade das mesmas (valores máximos a rondar os $1.2 \text{ hPa } (^\circ \text{ lat})^{-2}$). Note-se que comparando com o clima actual os valores registados no laplaciano da pressão mostram-se ligeiramente inferiores, em especial nas latitudes mais elevadas.

4.2.2. – Desvio Padrão:

Nesta subsecção será feita uma análise da variabilidade interanual para o período 2071 a 2100. À semelhança do realizado para o clima actual (subsecção 3.1.2.), esta análise apenas será realizada para as variáveis: número total de depressões, raio e intensidade.

Também, as imagens analisadas nesta subsecção estão disponíveis em anexo.

Número total de tempestades (TN):

Observando as figuras 13-A e 14-A ilustradas em anexo pode-se verificar que, tal como no clima actual, as zonas de maior desvio padrão situam-se nas latitudes acima dos 45°N , com exclusão da Gronelândia. Tal como adiantado na secção anterior (clima actual), a variabilidade do número total de tempestades estará associada à variabilidade interanual de padrões de teleconexão. Refira-se o máximo de desvio padrão que surge entre o sul da Península Ibérica e o norte de África no período de verão, associado à ocorrência de depressões térmicas, características desta região. Note-se, ainda, que ambos os modelos produzem padrões de desvio padrão semelhantes.

Raio (RO):

Analisando as figuras do desvio padrão do raio (15-A e 16-A) verifica-se que as zonas de maior variabilidade se localizam nas latitudes mais baixas sobre o oceano Atlântico. Este facto foi observado, também, no período 1971-2000, sendo que a causa avançada nessa secção é, também, válida aqui. Ambos os modelos reproduzem padrões semelhantes para os dois períodos do ano em causa, não se observando, também, diferenças entre a variabilidade no inverno e no verão.

Intensidade (INT):

As figuras 17-A e 18-A apresentam a variabilidade associada à intensidade no período 2071-2100. A par da Gronelândia, as regiões sobre o oceano mostram uma maior variabilidade na intensidade. O modelo ECHAM5 exhibe uma particularidade no período de inverno, ostentando uma extensa área entre o sul da Península Ibérica e o norte de África com elevado desvio padrão, tal como acontece nos resultados obtidos para o clima presente.

4.2.3. – Tendências

Ciclogénese (FG):

Os campos das tendências da ciclogénese para o período 2071-2100 mostram que estas são reduzidas/nulas na grande maioria do domínio. Contudo, é possível identificar pequenas regiões com algumas tendências com significância estatística não estando, no entanto, posicionadas nas mesmas regiões.

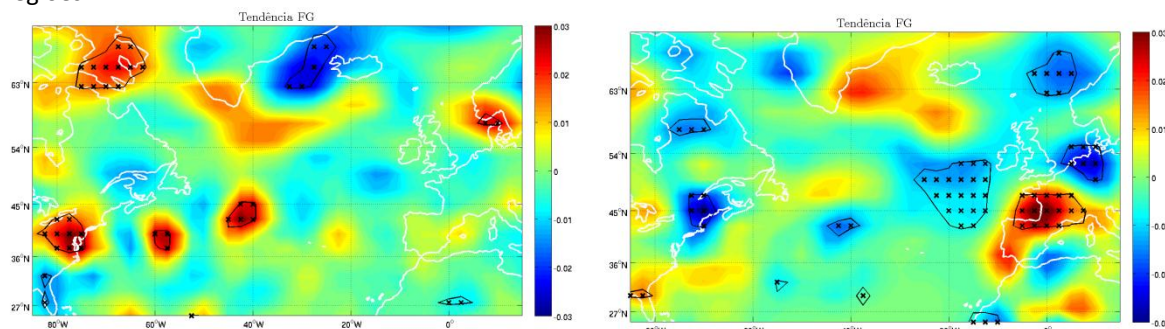


Fig.86 – Ciclogénese ($^{\circ}\text{lat}^{-2}\text{dia}^{-1}\text{ano}^{-1}$) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Modelo ECHAM5. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.

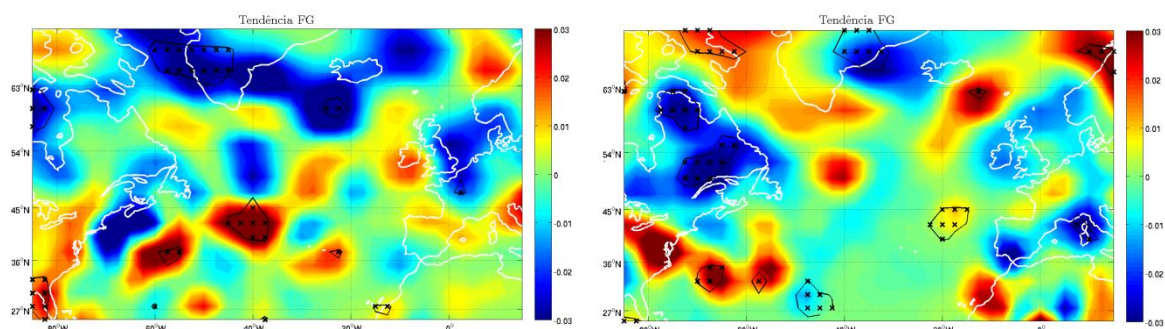


Fig.87 – Ciclogénese ($^{\circ}\text{lat}^{-2}\text{dia}^{-1}\text{ano}^{-1}$) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Modelo CCSM3. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.

Ciclólise (FL):

De igual modo ao verificado nas tendências da ciclogénese, as tendências da ciclólise apresentam-se maioritariamente reduzidas/nulas havendo poucos padrões semelhantes entre os dois modelos.

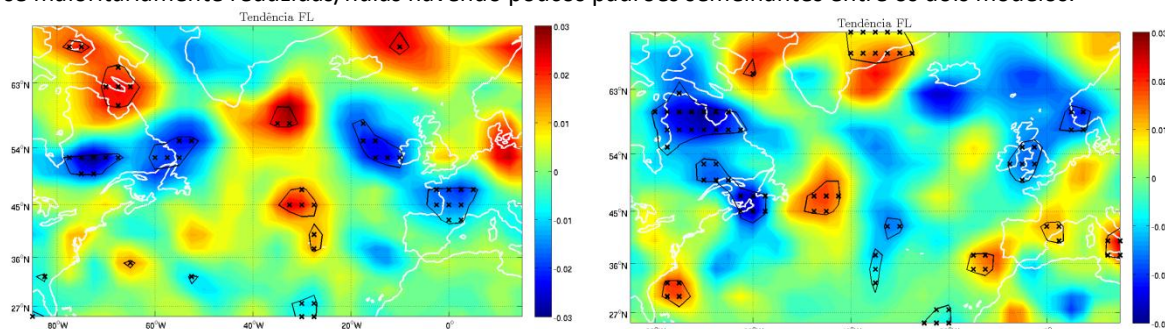


Fig.88 – Ciclólise ($^{\circ}\text{lat}^{-2}\text{dia}^{-1}\text{ano}^{-1}$) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Modelo ECHAM5. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.

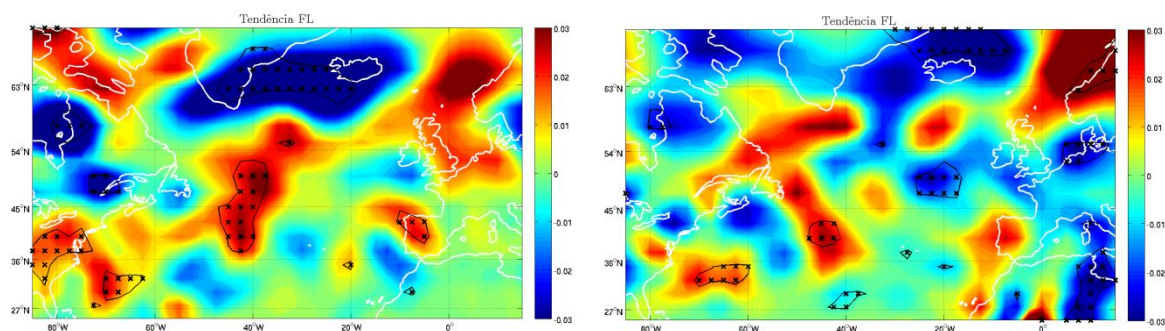


Fig.89 – Ciclólise ($^{\circ} \text{lat}^{-2} \text{dia}^{-1} \text{ano}^{-1}$) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Modelo CCSM3. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.

Número total de tempestades (TN):

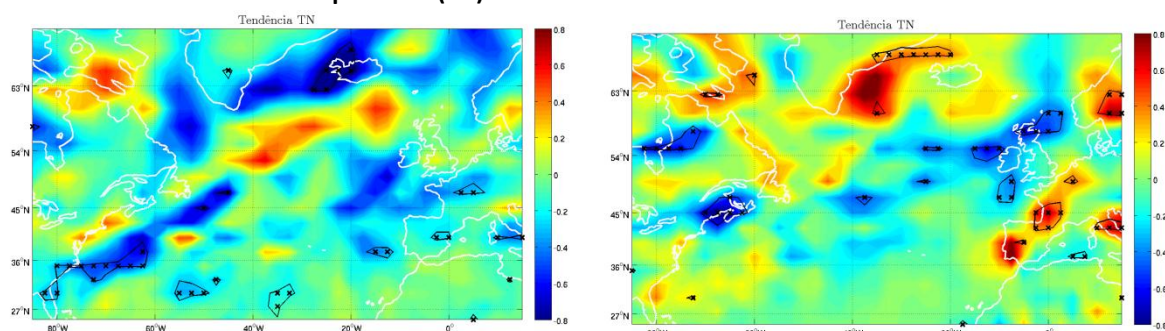


Fig.90 – Número total de tempestades (ano^{-1}) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Modelo ECHAM5. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.

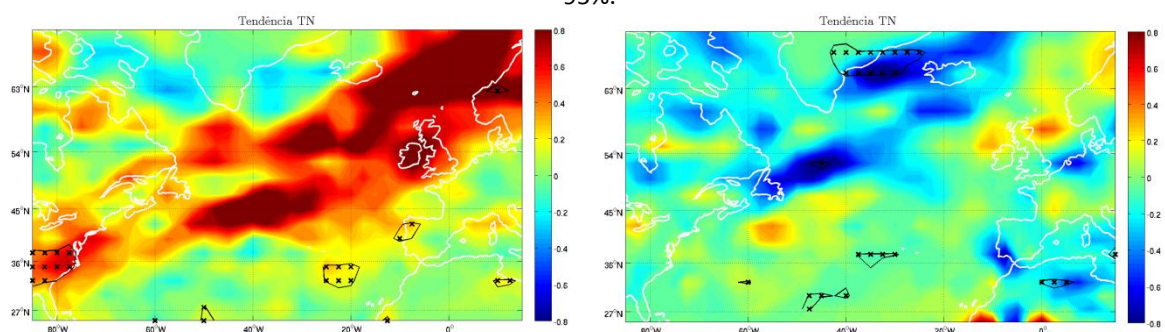


Fig.91 – Número total de tempestades (ano^{-1}) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Modelo CCSM3. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.

As tendências associadas ao número total médio de tempestades mostram que estas são tendencialmente reduzidas/nulas em grande parte do domínio, sendo que as tendências assinaladas como estatisticamente significativas não apresentam extensões consideráveis. Os dois modelos apresentam resultados distintos. O modelo ECHAM5 mostra sobretudo tendências negativas no período de inverno, verificando-se um resultado oposto no modelo CCSM3. Já no período de verão o modelo CCSM3 mostra sobretudo tendências negativas, enquanto o modelo ECHAM5 mostra algumas tendências positivas junto da Gronelândia e continente Europeu e tendências positivas junto das Ilhas Britânicas e nordeste da América do Norte.

Densidade de sistemas (SD):

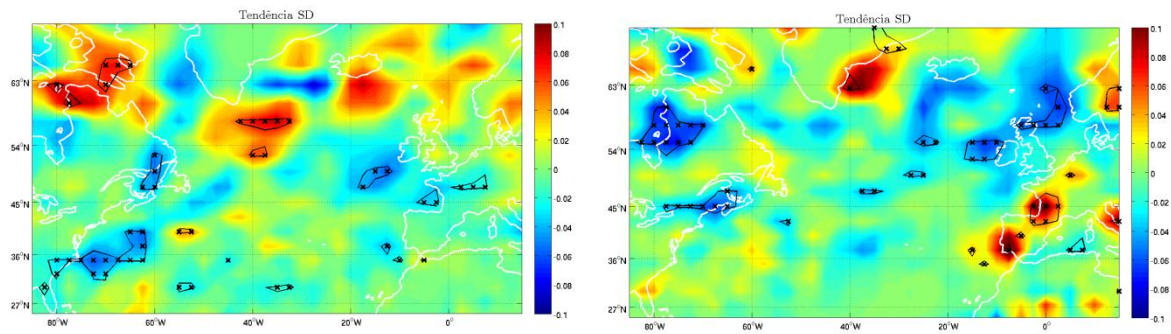


Fig.92 – Densidade de sistemas (ano^{-1}) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Modelo ECHAM5. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.

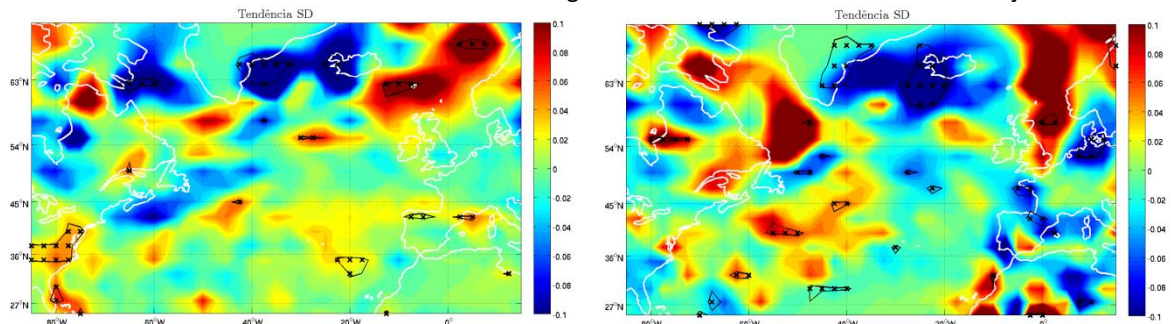


Fig.93 – Densidade de sistemas (ano^{-1}) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Modelo CCSM3. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.

As tendências associadas à densidade de sistemas mostram que estas são geralmente reduzidas/nulas, não se verificando, também, regiões expressivas com tendências estatisticamente significantes.

Profundidade (DP):

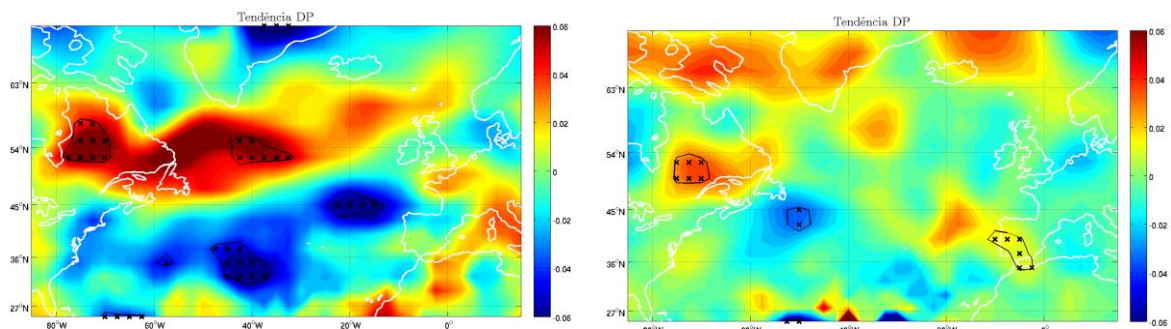


Fig.94 – Profundidade (hPa ano^{-1}) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Modelo ECHAM5. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.

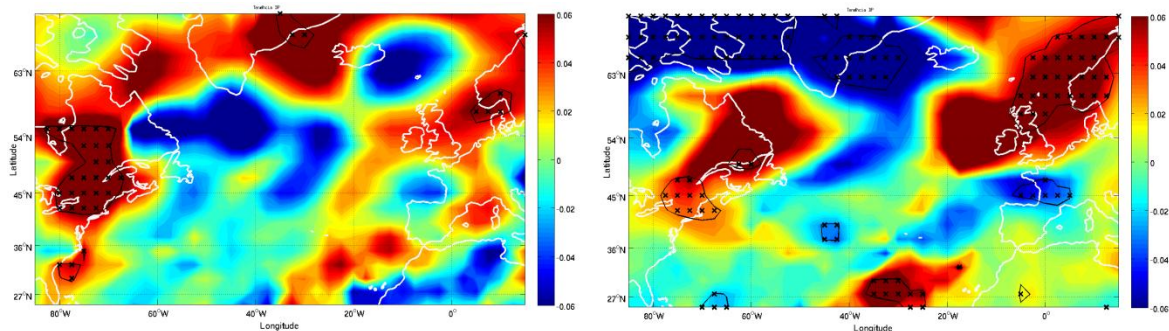


Fig.95 – Profundidade (hPa ano^{-1}) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Modelo CCSM3. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.

As figuras 94 e 95 mostram as tendências da profundidade dos ciclones para o período 2071-2100. Os dois modelos mostram-se pouco concordantes quanto às tendências verificadas. No período de inverno o modelo ECHAM5 mostra uma tendência para a profundidade aumentar na região do Québec e a sul da Gronelândia (aproximadamente 0.06 hPa/ano), mostrando uma diminuição a oeste dos Açores e a nordeste da Península Ibérica (aproximadamente 0.05 hPa/ano). Para o modelo CCSM3 podem-se verificar tendências positivas e com significado estatístico no nordeste da América do Norte, junto da Gronelândia e da Noruega (aproximadamente 0.06 hPa/ano). Este modelo não apresenta tendências negativas com significância estatística. No período de verão o modelo ECHAM5 mostra sobretudo tendências reduzidas/nulas, enquanto o modelo CCSM3 mostra algumas áreas extensas com tendências estatisticamente significativas. Entre essas regiões destacam-se as altas latitudes da América do Norte e Gronelândia, com tendências para a diminuição da profundidade das depressões ($0.04\text{-}0.06 \text{ hPa/ano}$), e ainda, uma tendência positiva a noroeste da Península Escandinávia, estendendo-se até ao norte das Ilhas Britânicas (aproximadamente 0.06 hPa/ano).

Pressão no centro (PC):

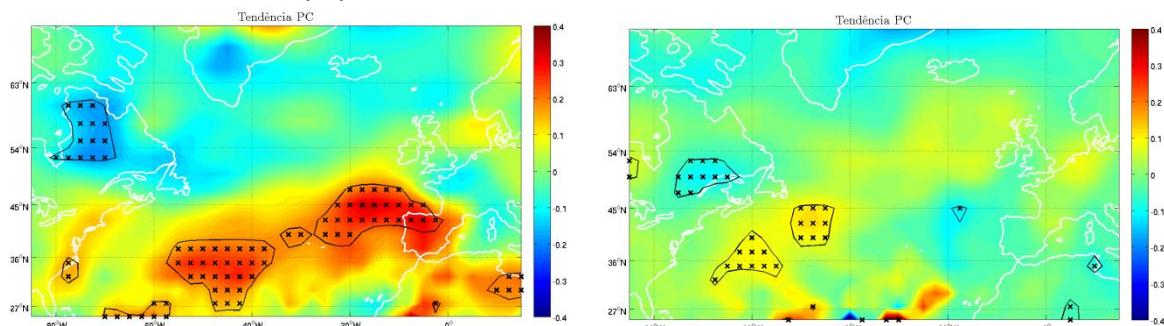


Fig.96 – Pressão no centro (hPa ano^{-1}) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Modelo ECHAM5. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.

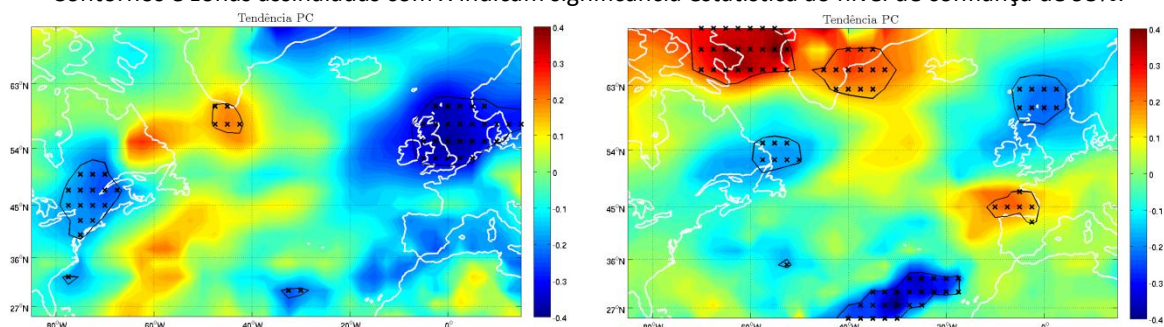


Fig.97 – Pressão no centro (hPa ano^{-1}) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Modelo CCSM3. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.

Analisando a tendência da pressão central média das tempestades durante os 30 anos em estudo verifica-se que os dois modelos reproduzem resultados algo diferentes. O único resultado concordante entre os dois modelos parece ser a diminuição da pressão central no nordeste da América do Norte, mais expressiva no período de inverno (0.2-0.3 hPa/ano). Para este período o modelo ECHAM5 mostra, ainda, uma vasta área sobre o oceano Atlântico e nordeste da Península Ibérica com tendência para o aumento da pressão central das tempestades (0.2-0.3 hPa/ano), enquanto no mesmo período o modelo CCSM3 mostra uma tendência significativa para a diminuição da mesma junto das Ilhas Britânicas e sudoeste da Península Escandinávia (0.3-0.4 hPa/ano). No período de verão as tendências mostram-se um pouco mais reduzidas (sendo, preferencialmente, nulas em alguns locais). Ainda assim, o modelo CCSM3 mostra algumas áreas mais extensas com tendências significantes, destacando-se as altas latitudes junto da Gronelândia, com uma tendência positiva (0.2-0.4 hPa/ano).

Raio (RO):

Observando as tendências do raio para os dois modelos verifica-se que ambos mostram uma tendência positiva nas regiões de latitudes superiores durante o período de inverno (aproximadamente 0.02-0.03 °lat./ano). Esta situação tem maior expressividade e significado estatístico no modelo CCSM3. As regiões onde tal se observa de forma mais consistente são a região nordeste do Canadá e a região a noroeste da Escandinávia.

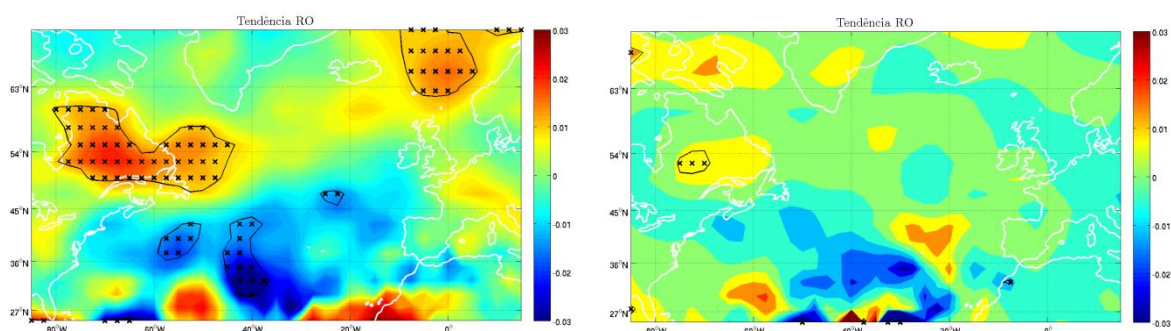


Fig.98 – Raio ($^{\circ}\text{lat ano}^{-1}$) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Modelo ECHAM5. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.

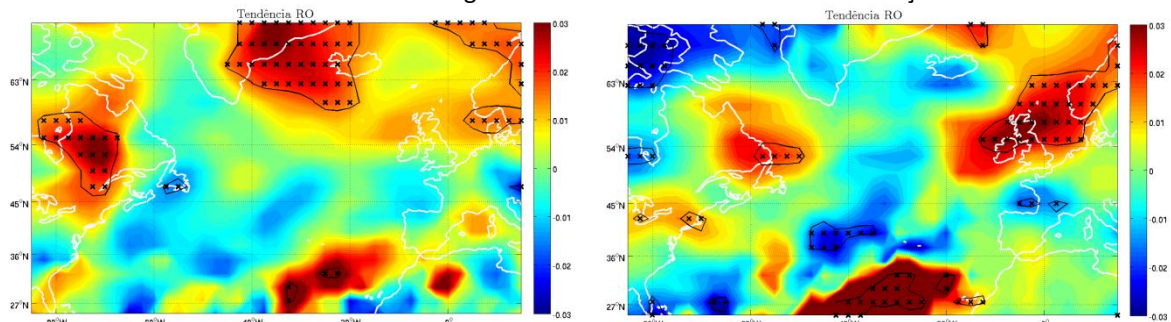


Fig.99 – Raio ($^{\circ}\text{lat ano}^{-1}$) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Modelo CCSM3. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.

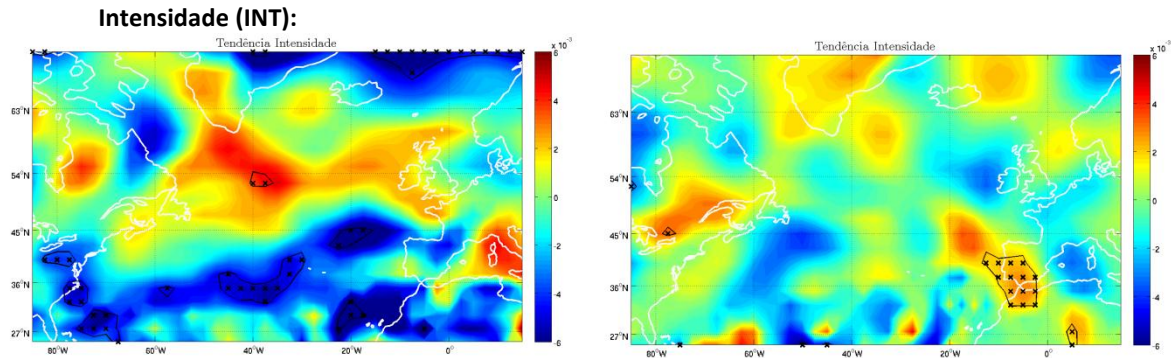


Fig.100 – Tendência da Intensidade ($\text{hPa } ^\circ\text{lat}^{-2} \text{ano}^{-1}$) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Modelo ECHAM5. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.

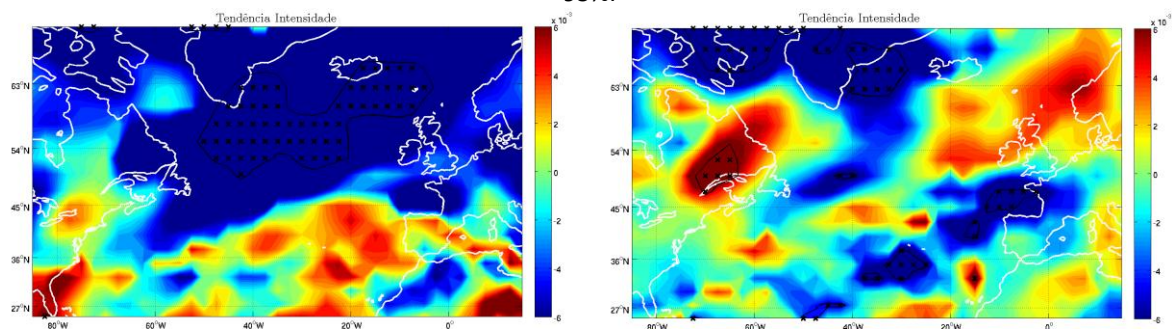


Fig.101 – Tendência da Intensidade ($\text{hPa } ^\circ\text{lat}^{-2} \text{ano}^{-1}$) no inverno (esquerda) e no verão (direita) – Modelo CCSM3. Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.

As figuras 100 e 101 mostram a tendência da intensidade durante o período 2071 a 2100. Pode verificar-se que os resultados dos dois modelos apresentam algumas diferenças importantes. Para o período de inverno ambos os modelos apresentam vastas regiões com tendências negativas da intensidade, diferindo, entre eles, no posicionamento das mesmas. Enquanto o modelo ECHAM5 coloca essas tendências abaixo dos 40°N (variando entre os 0.004 e $0.006 \text{ hPa } ^\circ\text{lat}^{-2} \text{ano}^{-1}$), e em algumas regiões subpolares da Noruega e Gronelândia (0.004 e $0.006 \text{ hPa } ^\circ\text{lat}^{-2} \text{ano}^{-1}$), o modelo CCSM3 coloca essas tendências (aproximadamente $0.006 \text{ } ^\circ\text{lat}^{-2} \text{ano}^{-1}$) em quase todo o domínio acima dos 45°N . Em termos de significância estatística no modelo ECHAM5 apenas algumas regiões pontuais apresentam tendências com significado estatístico, enquanto no modelo CCSM3 uma área extensa pode ser identificada entre o sul da Islândia e Gronelândia e o norte/nordeste das Ilhas Britânicas. Para o período de verão as tendências obtidas do modelo CCSM3 raramente se mostram expressivas, excepto para uma pequena área sobre a Península Ibérica e norte de África, onde se pode verificar um aumento significativo da intensidade. No modelo CCSM3 podem identificar-se tendências para a diminuição da intensidade dos ciclones com significância estatística junto da Gronelândia e norte/nordeste do Canadá e, ainda, numa faixa que se estende sobre o oceano Atlântico desde o sudoeste dos Açores até ao Golfo da Biscaia.

4.2.4. – Conclusões

À semelhança do realizado para o clima presente os resultados das estações intermédias, nomeadamente primavera e outono, não serão apresentados por não exibirem diferenças substanciais aos períodos de inverno e verão. Contudo, diga-se que os resultados mostram que estas continuam a ser estações transitórias entre a época de inverno e de verão, apresentando uma ligeira redução da actividade

ciclónica por comparação ao período de inverno, e uma actividade superior por comparação ao período de verão.

A análise realizada para o período 2071-2100 mostra que não existem diferenças significativas na actividade ciclónica, por comparação à verificada no período 1971-2000. Os locais preferenciais à formação e dissipação de ciclones permanecem quase inalterados. Não se identificam, igualmente, alterações significativas no posicionamento do caminho tipo dos ciclones e zonas onde eles são maiores, mais intensos, profundos e com menor pressão central. Em termos de tendências os dois modelos apresentaram em alguns casos resultados contraditórios. No caso do número total de tempestades o modelo ECHAM5 mostra uma tendência geral para a redução do número total de tempestades, sendo que o modelo CCSM3 apresenta um resultado oposto. A tendência para a redução do número de ciclones já havia sido referida pelos trabalhos de Lambert e Fyfe (2006), Pinto et al. (2007), e Pinto et al. (2008), dando mais consistência ao resultado obtido pelo modelo ECHAM5. De igual modo na tendência da intensidade dos ciclones os modelos apresentam algumas diferenças importantes, no entanto, para o período de inverno a tendência principal indica uma redução no número total de tempestades, diferindo entre eles apenas no posicionamento destas diminuições. A maior concordância entre os dois modelos regista-se na tendência do raio médio, observando-se uma tendência para o aumento do tamanho das tempestades nas latitudes mais elevadas, sendo esse aumento mais expressivo no modelo CCSM3.

A variabilidade interanual não se altera entre os dois climas para ambos os modelos. Pinto et al. (2007;2008) refere uma tendência para o aumento da variabilidade interanual nas latitudes mais elevadas acompanhado da ocorrência de ciclones mais intensos. Porém, este resultado não é claro na análise realizada neste trabalho.

Analisando os resultados para o território de Portugal Continental, arquipélagos dos Açores e Madeira não se verificam alterações substanciais. Estes locais continuam a não fazer parte das zonas mais favoráveis para a formação ou dissipação de tempestades, pois continuam a apresentar valores reduzidos de ciclogénese e ciclólise. As médias do número total de tempestades para o período 2071-2100 indicam valores a rondar os 15 a 25 ciclones no inverno em Portugal Continental e Madeira (registando-se uma ligeira quebra em relação aos valores registados pelos modelos no clima actual), enquanto a região dos Açores apresenta valores ligeiramente superiores, 20 a 30 ciclones (valores próximos dos verificados no clima actual), com os valores mais elevados a registarem-se nas ilhas mais a ocidente. Durante o período de verão existe uma diminuição clara nos arquipélagos para valores próximos de 10 a 15 ciclones, enquanto na região Continental verifica-se um aumento do número de ciclones para valores superiores a 30 ciclones por verão. Refira-se que é visível um aumento da actividade ciclónica nesta região durante o período de verão, por comparação ao período 1971-2000. Os valores de pressão no centro e profundidade não registam variações assinaláveis comparativamente ao clima actual. Porém, uma diminuição no raio médio dos ciclones é visível registando-se valores de aproximadamente 4.2 a 4.6° latitude para as duas estações no modelo CCSM3 e no período de verão para o modelo ECHAM5, sendo que este último apresenta para o inverno valores em torno dos 4.6 a 4.8° latitude. Os valores do laplaciano médio da pressão mantêm-se semelhante aos verificados no período 1971-2000.

Poucas tendências com significado estatístico ao nível de confiança de 95% podem ser observadas. Ainda assim, uma das mais expressivas é apresentada pelo modelo ECHAM5 durante o período de inverno, mostrando uma tendência para o aumento da pressão central dos ciclones em aproximadamente 0.2 a 0.3 hPa/ano na região mais a norte de Portugal Continental e no arquipélago dos Açores.

4.3. Perfis Meridionais

Nesta secção serão apresentados perfis meridionais de algumas variáveis nos dois climas. Estes perfis correspondem a médias zonais do domínio em estudo dos parâmetros: número total de tempestades, raio e intensidade. São apresentados os perfis obtidos com os quatro conjuntos de dados utilizados no clima actual, e os dois modelos utilizados para o clima futuro.

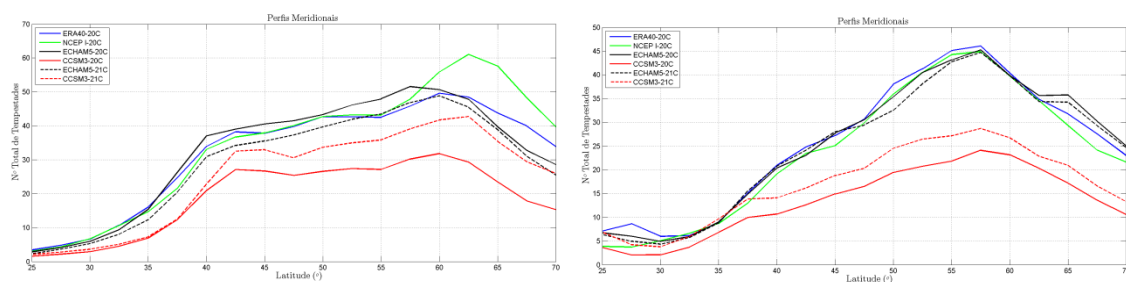


Fig.102 – Perfis meridionais do número total de tempestades médio no inverno (esquerda) e verão (direita).

A figura 102 mostra os perfis meridionais do número total de tempestades. Como se pode verificar é acima dos 40°N que ocorre o maior número de tempestades, estando o máximo posicionado entre os 60°N a 65°N no inverno, e 55°N a 60°N no verão. Este pico é mais expressivo no período de verão. É, também, visível uma clara redução do número de tempestades do período de inverno para o período de verão, mais expressiva nas latitudes mais elevadas.

Comparando os diferentes conjuntos de dados verifica-se que as reanálises NCEP I e ERA40 apresentam perfis muito semelhantes. Contudo, durante o período de inverno em latitudes superiores a aproximadamente 55°N as reanálises NCEP I apresentam um valor superior no número médio de tempestades (a diferença máxima supera as 10 tempestades). O inverso pode ser verificado abaixo da referida latitude, embora, não de forma tão expressiva. Durante o período de verão as reanálises ERA40 apresentam um número ligeiramente superior de tempestades (aproximadamente 3 a 5 ciclones). Olhando aos resultados provenientes dos modelos, verifica-se que o modelo ECHAM5 apresenta perfis mais próximos dos obtidos nas reanálises, enquanto o modelo CCSM3 mostra uma tendência para produzir menos sistemas que os restantes.

Comparando os perfis obtidos no clima actual e futuro pode-se verificar que os dois modelos apresentam evoluções distintas. O modelo ECHAM5 mostra uma redução do número médio de ciclones (especialmente no período de inverno), ao passo que o modelo CCSM3 mostra um aumento desse número, em todas as latitudes e em ambas as estações do ano.

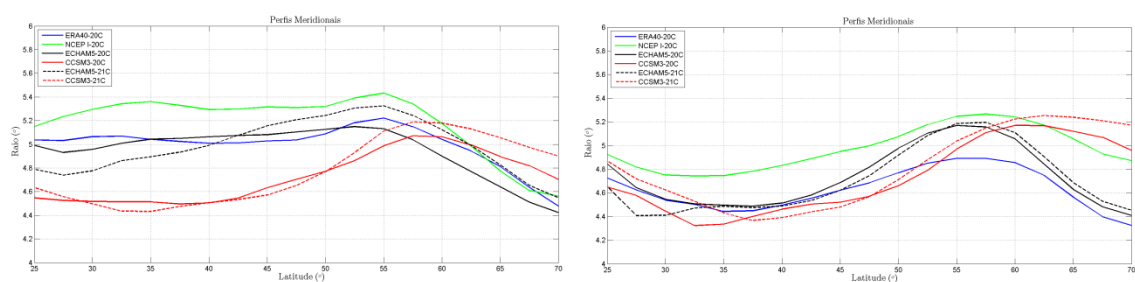


Fig.103 – Perfis meridionais do raio médio (° lat) no inverno (esquerda) e verão (direita).

A figura 103 mostra as médias zonais do raio das tempestades. Estas mostram que o raio obtido com reanálises NCEP I é geralmente superior ao raio das tempestades em ERA40. Esta diferença ronda os 0.2 a 0.4 ° de latitude no inverno e os 0.3 a 0.5 ° de latitude no verão. Os dados de ERA40, NCEP I e ECHAM5 mostram uma ligeira redução do raio do período de inverno para o período de verão (clima actual). No período de inverno observa-se uma clara diminuição do tamanho das tempestades acima dos 55°N. Esta quebra, também, pode ser notada no período de verão, contudo, nesta estação é antecedida de um máximo, justamente por volta dos 55°N.

Os modelos apresentam perfis próximos aos obtidos com dados de reanálises, excepção para as latitudes inferiores a 55°N no período de inverno no modelo CCSM3.

Comparando os dois climas em estudo pode-se verificar que no período de inverno o modelo ECHAM5 mostra uma ligeira redução do tamanho das tempestades nas latitudes mais baixas (aproximadamente 25°N a 42°N), e um ligeiro aumento acima destas latitudes (também acompanhado em boa parte pelo modelo CCSM3). Já no período de verão estas diferenças são mais reduzidas verificando-se um ligeiro aumento acima dos 42/47°N. Abaixo destas latitudes os dois modelos mostram resultados diferentes observando-se um aumento no modelo CCSM3, e uma redução no modelo ECHAM5.

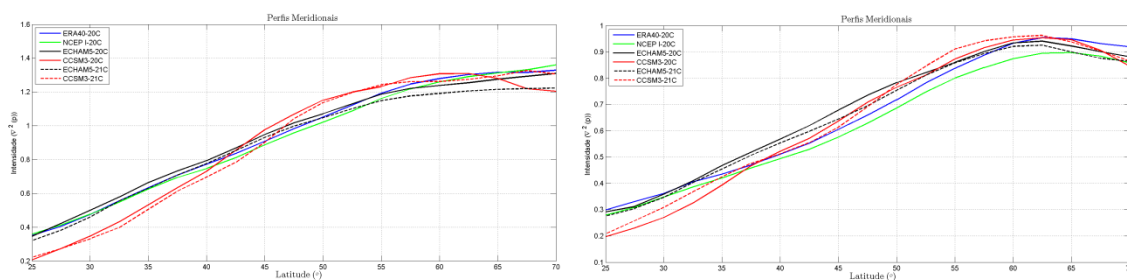


Fig.104 – Perfis meridionais da intensidade ($\text{hPa } (^\circ \text{ lat})^2$) no inverno (esquerda) e verão (direita).

Finalmente, a figura 102 mostra os perfis meridionais da intensidade. Facilmente se observa que as intensidades máximas ocorrem nas latitudes mais elevadas, sendo, também, superiores no período de inverno (1.2 a $1.4 \text{ hPa } (^\circ \text{ lat})^2$) por comparação ao período de verão (0.85 a $0.95 \text{ hPa } (^\circ \text{ lat})^2$).

Os quatro conjuntos de dados apresentam perfis muito semelhantes sendo que o modelo CCSM3 é aquele que difere mais notoriamente dos outros três pois, neste último, verificam-se intensidades mais baixas nas latitudes inferiores. Note-se, ainda, que os sistemas gerados por reanálises NCEP I tendem a apresentar intensidade ligeiramente inferior aos gerados pelas reanálises ERA40, sendo este efeito mais visível no período de verão. Contudo a diferença de intensidade é reduzida.

Olhando aos dois climas em estudo, não são visíveis diferenças expressivas mostrando-se apenas uma ligeira redução das intensidades no período de inverno em ambos os modelos, enquanto no período de verão o modelo CCSM3 mostra um ligeiro aumento, por oposição ao ECHAM5 onde se verifica uma ligeira redução da intensidade.

5. Conclusões:

Após a aplicação do algoritmo de detecção e *tracking* aos diferentes conjuntos de dados, várias conclusões podem ser referidas acerca da actividade ciclónica nos dois climas estudados.

A análise feita para o clima actual mostra que é nas latitudes mais elevadas do domínio, tipicamente acima dos 50°N, que se concentra a maior parte da actividade ciclónica. É acima destas latitudes que ocorrem ciclones mais profundos, com menor pressão central e de maior intensidade. O estudo dos campos de ciclogénese, ciclólise e número total de tempestades permitiu verificar que uma boa parte dos ciclones que assolam a região em estudo tendem a formar-se junto da costa leste da América do Norte, deslocando-se posteriormente para nordeste e dissipando-se nas latitudes mais elevadas junto da Gronelândia, traçando-se assim a *storm track* desta região. Ao estudar o raio médio dos ciclones verificou-se que estes tendem a ser superiores no inverno e sobre o oceano.

Ao observar os resultados obtidos nas quatro estações do ano pôde-se averiguar que a actividade ciclónica é máxima no período de inverno, decrescendo ao longo da primavera e atingindo o seu mínimo no período de verão. Uma nova subida é registada com a chegada dos meses de outono. Ainda assim, as alterações mais significativas registam-se entre as estações de transição (primavera e outono) e o verão (onde a quebra na actividade ciclónica é superior).

O período 1971-2000 mostra uma tendência para o aumento estatisticamente significativo da intensidade dos ciclones durante o inverno em algumas regiões mais a norte do domínio, destacando-se o nordeste do Canadá e numa vasta região compreendida entre a Islândia e a Península Escandinávia. Este aumento ganha maior consistência ao observar-se que os campos da tendência da profundidade e da pressão central revelam que os ciclones tendem a apresentar pressões centrais menores e profundidades maiores também nas latitudes mais elevadas. Uma tendência para a diminuição do raio, em especial durante o período de verão, também, pode ser observada. As regiões junto da Islândia, norte do Canadá e Península Escandinávia apresentam tendências ligeiras para o aumento do número de ciclones durante o período de inverno. Este efeito é mais notório em reanálises NCEP I.

Ambas as reanálises mostraram resultados muito semelhantes, apenas verificando-se algumas diferenças no número total de tempestades e na dimensão média das mesmas. Durante o período de inverno as reanálises NCEP I tendem a produzir mais sistemas em latitudes superiores a 55°N face às reanálises ERA40, observando-se o inverso em latitudes inferiores. Durante o período de verão verifica-se que as reanálises ERA40 geram um número ligeiramente superior de ciclones em todas as latitudes (aproximadamente 3 a 5 ciclones). Os sistemas gerados pelas reanálises NCEP I tendem, ainda, a apresentar raios superiores aos gerados por reanálises ERA40 (aproximadamente 0.2 a 0.4 ° de latitude no inverno e 0.3 a 0.5 ° de latitude no verão), e intensidades inferiores. Contudo a diferença observada nas intensidades é reduzida, mesmo durante o verão (altura em que é mais notória).

Os resultados obtidos pelos modelos para o período 1971-2000 revelaram-se satisfatoriamente concordantes com os obtidos com dados de reanálises, definindo bem os locais típicos para ciclogénese, ciclólise e *storm track*. O modelo CCSM3 aparentou ser aquele que mais se desviou em relação aos resultados obtidos nas reanálises, observando-se uma tendência para produzir menos sistemas, tendo estes, pressão central mais reduzida e menor tamanho. O modelo ECHAM5 foi o que mais se aproximou dos resultados das reanálises, sendo que a diferença mais significativa relaciona-se com a produção de sistemas menores.

A análise dos resultados obtidos para o clima futuro mostrou que não existem alterações significativas à actividade ciclónica verificada durante o período 1971-2000. Ainda assim, algumas alterações foram verificadas, entre as quais se destaca o deslocamento para norte em aproximadamente 3° do número máximo da média zonal de ciclones durante o período de inverno, podendo indiciar uma movimentação para norte da *storm track*. Observando-se os perfis meridionais do número total de tempestades, pode-se verificar que ambos os modelos mostraram uma tendência para uma ligeira diminuição da intensidade dos ciclones no clima futuro.

Em suma, este trabalho permitiu produzir e estudar de forma muito satisfatória a actividade ciclónica verificada na região do Atlântico Norte, leste da América de Norte e grande parte da Europa, permitindo, ainda, obter um olhar sobre como esta possa vir a decorrer num clima futuro. Muitos dos resultados referidos na literatura actual foram corroborados não deixando, no entanto, de se verificar alguns diferentes dos já existentes. Eventuais diferenças não deixarão de estar interligadas com o domínio em estudo, e principalmente com o método de *tracking* utilizado, tal como é referido em Raible et al. (2008).

Com base nos resultados obtidos neste trabalho, outros futuros podem ser realizados. A interligação de padrões de teleconexão e o tipo de actividade ciclónica, nomeadamente a sua relação com a variabilidade interanual poderão ser estudados. Outros estudos poderão dirigir-se no sentido de compreender a estrutura vertical e desenvolvimento dos ciclones, podendo ajudar a compreender melhor a sua actividade na região do oceano Atlântico Norte.

6. Referências:

- ✓ Ahrens, C.D. (1999). Essentials of meteorology – an invitation to the atmosphere. Terceira edição. Editor Thomson. 468pp.
- ✓ Blender R, Fraedrich K, Lunkheit F (1997) Identification of cyclone-track regimes in the North Atlantic. Quart J R Met Soc 123:727–741
- ✓ Collins, W. D., Bitz, C. M., Blackmon, M. L., Bonan, G. B., Bretherton, C. S., Carton, J. A., Chang, P., Doney, S. C., Hack, J. J., Henderson, T. B., Kiehl, J. T., Large, W. G., McKenna, D. S., Santer, B. D.,

- Smith, R. D., 2006. The Community Climate System Model Version 3 (CCSM3). *J. Climate* 19, 2122–2143.
- ✓ Jones, D. A and Simmonds, I. 1993: A climatology of Southern Hemisphere extratropical cyclones. *Climate Dynamics*, 9, 131-145.
 - ✓ Gulev SK, Zolina O Grigoriev S (2001) Extratropical cyclone variability in the northern hemisphere winter from NCEP/NCAR reanalysis data. *Clim Dyn* 17:795–809
 - ✓ Hanson CE, Palutikof JP, Davies TD (2004) Objective cyclone climatologies of the North Atlantic—a comparison between the ECMWF and NCEP Reanalyses. *Clim Dyn* 22:757–769
 - ✓ Hodges KI (1994) A general method for tracking analysis and its application to meteorological data. *Mon Wea Rev* 122:2573–2586
 - ✓ Hoskins BJ, Hodges KI (2002) New perspectives on the northern hemisphere winter storm tracks. *J Atmos Sci* 59:1041–1061
 - ✓ Meehl, G.A., T.F. Stocker, W.D. Collins, P. Friedlingstein, A.T. Gaye, J.M. Gregory, A. Kitoh, R. Knutti, J.M. Murphy, A. Noda, S.C.B. Raper, I.G. Watterson, A.J. Weaver and Z.-C. Zhao, 2007: Global Climate Projections. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
 - ✓ Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K. C., Ropelewski, C., Wang, J., Leetmaa, A., Reynolds, R., Jenne, R., Joseph, D., 1996. The NMC/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 77, 437–471.
 - ✓ JOHN C. FYFE - Extratropical Southern Hemisphere Cyclones: Harbingers of Climate Change? *Journal of Climate*, vol. 16, Issue 17, pp.2802-2805
 - ✓ Holton, J. R., 2004. An introduction to Dynamic Meteorology, Fourth Edition. International Geophysics Series, Vol. 88. Elsevier Academic Press.
 - ✓ Lambert, Steven J. and Mitchell, Herschel L., The Canadian Meteorological Centre (CMC) global analyses (1991–1996): An evaluation by comparison with the ECMWF and NCEP analyses: Research note, *Atmosphere-Ocean*, volume 36, number 4, pages 385-404, year 1998, doi 10.1080/07055900.1998.9649618
 - ✓ Lambert and Fyfe, 2006 - Changes in winter cyclone frequencies and strengths simulated in enhanced greenhouse warming experiments: results from the models participating in the IPCC diagnostic exercise. *Clim Dyn* 26:713–728
 - ✓ Le Treut and Kalnay 1990 - Comparison of observed and simulated cyclone frequency distribution as determined by an objective method. *Atmosfera* 3:57–71
 - ✓ Lim Eun-Pan, Simmonds Ian. 2007. - Southern Hemisphere winter extratropical Cyclone characteristics and vertical organization observed with ERA-40 data in 1979-2001. *American Meteorological Society*.
 - ✓ Lionello P, Dalan F, Elvini E (2002) Cyclones in the Mediterranean region: the present and the doubled CO2 climate scenarios. *Clim Res* 22:147–159
 - ✓ Löptien U, Zolina O, Gulev SK, Latif M, Soloviev V (2008). Cyclone life cycle characteristics over the northern hemisphere in coupled GCMs. *Clim Dyn* 31:507–532
 - ✓ Murray Ross J, Simmonds Ian. 1991. - A numerical scheme for tracking cyclone centres from digital data Part 1: Development and operation of scheme. *Australian Meteorological Magazine* 39:155-166.
 - ✓ Nebojsa Nakicenovic, Joseph Alcamo, Gerald Davis, Bert de Vries, Joergen Fenhann, Stuart Gaffin, Kenneth Gregory, Arnulf Grübler, Tae Yong Jung, Tom Kram, Emilio Lebre La Rovere, Laurie Michaelis, Shunsuke Mori, Tsuneyuki Morita, William Pepper, Hugh Pitcher, Lynn Price, Keywan Riahi, Alexander Roehrl, Hans-Holger Rogner, Alexei Sankovski, Michael Schlesinger, Priyadarshi Shukla, Steven Smith, Robert Swart, Sascha van Rooijen, Nadejda Victor, Zhou Dadi IPCC Special Report on Emissions Scenarios (SRES).: Special Report on Emissions Scenarios, Working Group III, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Cambridge University Press, Cambridge, 2000. <http://www.grida.no/climat/ipcc/emission/index.htm>
 - ✓ Pinto JG, Spanghel T, Ulbrich U, Speth P (2005). Sensitivities of a cyclone detection and tracking algorithm: individual tracks and climatology. *Meteorol Z* 14:823–838

- ✓ Pinto JG, Ulbrich U, Leckebusch GC, Spanghel T, Reyers M, Zacharias S. (2007). Changes in storm track and cyclone activity in three SRES ensemble experiments with the ECHAM5/MPI-OM1 GCM
- ✓ Pinto JG, Zacharias S, Fink AH, Leckebusch GC, Ulbrich U. Changing European storm loss potentials under modified climate conditions according to ensemble simulations of the ECHAM5/MPI-OM1 GCM
- ✓ Raible CC, 2007. On the relation between extremes of mid latitude cyclones and the atmospheric circulation using ERA40. *Geophys Res Lett* 34:L07703. doi:10.1029/2006GL029084
- ✓ Raible CC, Della-Marta P, Schwierz C, Wernli H, Blender R, 2008 - Northern hemisphere extratropical cyclones: a comparison of detection and tracking methods and different reanalyses. *Mon Wea Rev* 136:880–897
- ✓ Rice, 1982 - The Derivation of Computer-based Synoptic Climatology of Southern Hemisphere Extratropical Cyclones. Honours Thesis. Department of Meteorology. University of Melbourne
- ✓ Roeckner E, Brokopf R, Esch M, Giorgetta M, Hagemann S, Kornblueh L, Manzini E, Schlese U, Schulzweida U (2006) Sensitivity of simulated climate to horizontal and vertical resolution in the ECHAM5 atmosphere model. *J Clim* 19:3771–3791
- ✓ Rudeva I, Gulev SK (2007). Climatology of cyclone size characteristics and their changes during the cyclone life cycle. *Monthly weather review*.
- ✓ Simmonds Ian, Murray Ross J. 1999. A refinement of cyclone tracking methods with data from FROST. *Australian Meteorological Magazine Special Edition* 35-49.
- ✓ Simmonds I, Keay K (2000) Variability of Southern Hemisphere Extratropical Cyclone Behaviour, 1958-97. *J Clim* 13:550–561
- ✓ Sinclair, 1994 - An objective cyclone climatology for the southern hemisphere. *Mon Wea Rev* 122:2239–2256
- ✓ Sinclair, 1995 - A climatology of cyclogenesis for the southern hemisphere. *Mon Wea Rev* 123:1601–1619
- ✓ Sinclair, 1997 - Objective identification of cyclones and their circulation intensity, and climatology. *Weather Forecasting* 12:595–612
- ✓ Serreze, 1995 - Climatological aspects of cyclone development and decay in the Arctic. *Atmos–Ocean* 33:1–23
- ✓ Teixeira, Marta (2011) – Depressões no Oceano Atlântico Norte.
- ✓ Trigo IF (2006). Climatology and interannual variability of storm tracks in the Euro-Atlantic sector: a comparison between ERA-40 and NCEP/NCAR reanalyses. *Clim Dyn* 26:127–143
- ✓ Ulbrich U, Pinto JG Kupfer H, Leckebusch GC, Spanghel T, Reyers M (2008). Changing Northern Hemisphere Storm Tracks in an Ensemble of IPCC Climate Change Simulations
- ✓ Uppala, S. M., Kallberg, P. W., Simmons, A. J., Andrae, U., da Costa Bechtold, V., Fiorino, M., Gibson, J., Haseler, J., Hernandez, A., Kelly, G. A., Li, X., Onogi, K., Saarinen, S., Sokka, N., Allan, R. P., Andersson, E., Arpe, K., Balmaseda, M. A., Beljaars, A. C. M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Caires, S., Chevallier, F., Dethof, A., Dragosavac, M., Fisher, M., Fuentes, M., Hagemann, S., Hlm, E., Hoskins, B. J., Isaksen, I., Janssen, P. A. E. M., Jenne, R., McNally, A. P., Mahfouf, J.-F., Morcrette, J.-J., Rayner, N. A., Saunders, R. W., Simon, P., Sterl, A., Trenberth, K. E., Untch, A., Vasiljevic, D., Viterbo, P., Woollen, J., 2005. The ERA-40 re-analysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 131, 2961–3012.
- ✓ Van Bebber, 1891 - Die Zugstraßen der barometrischen Minima nach den Bahnenkarten der Deutsche Seewarte für den Zeitraum 1875-1890. *Meteorol Z* 8:361–366
- ✓ Wang XLL, Swail VR, Zwiers FW (2006b) Observed changes in cyclone activity in Canada and their relationships to major circulation regimes. *J Clim* 19:895–906
- ✓ Wernli and Schwierz, 2006 - Surface cyclones in the ERA-40 data set, part I, novel identification method and global climatology. *J*
- ✓ Wilks, Daniel S. (2006). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Segunda Edição. Editora Academic Press. 649pp.

Anexo

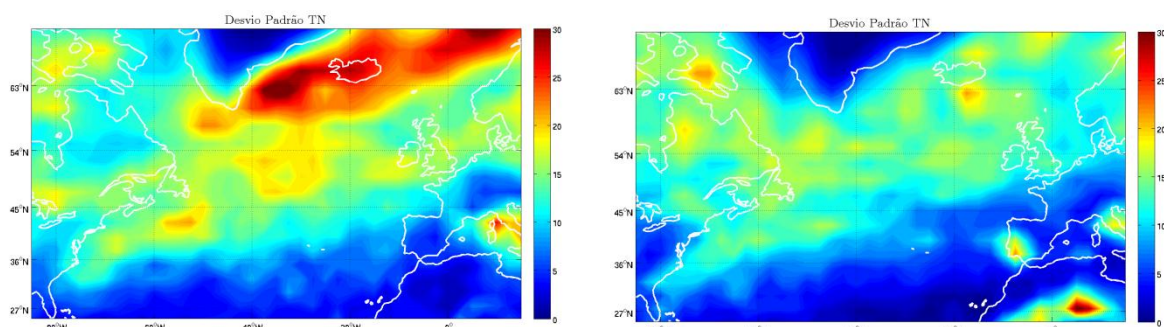


Fig.1-A – Desvio padrão do número total de tempestades no inverno (esquerda) e verão (direita). Período 1971 – 2000. Reanálises ERA40.

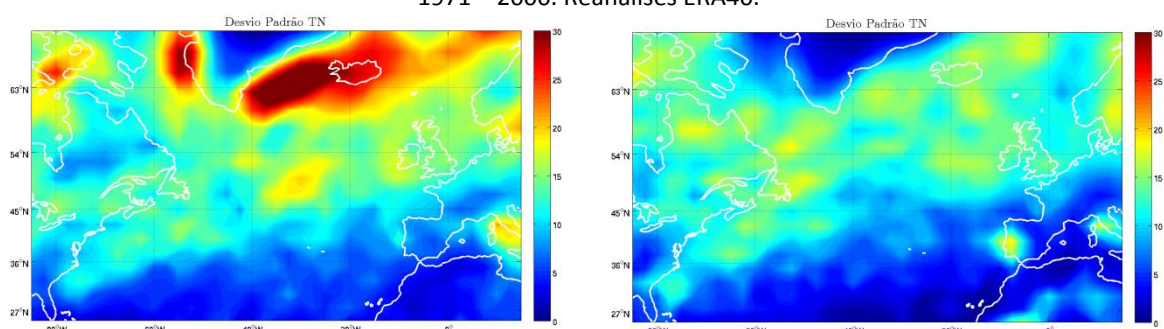


Fig.2-A – Desvio padrão do número total de tempestades no inverno (esquerda) e verão (direita). Período 1971 – 2000. Reanálises NCEP I.

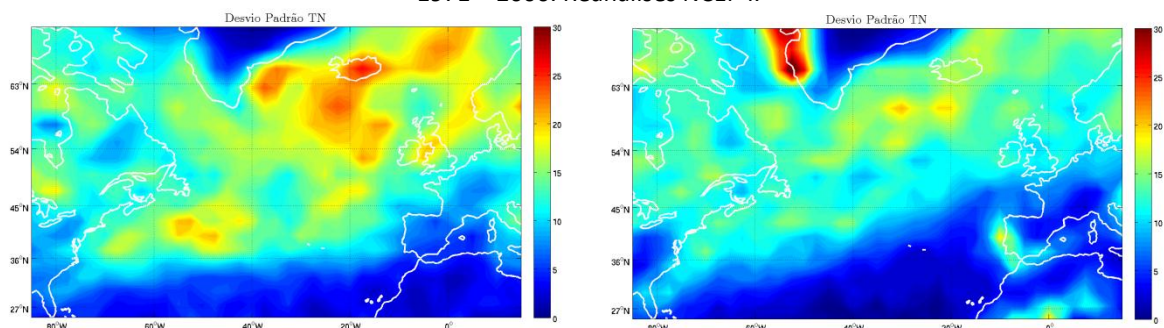


Fig.3-A – Desvio padrão do número total de tempestades no inverno (esquerda) e verão (direita). Período 1971 – 2000. Modelo ECHAM5.

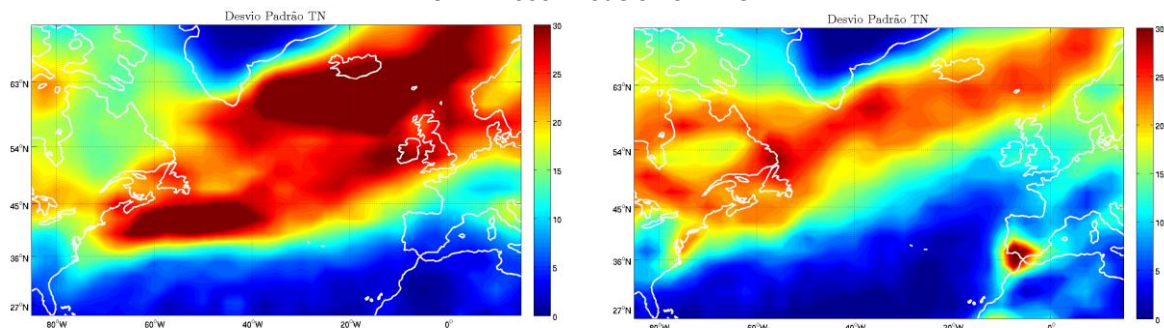


Fig.4-A – Desvio padrão do número total de tempestades no inverno (esquerda) e verão (direita). Período 1971 – 2000. Modelo CCSM3.

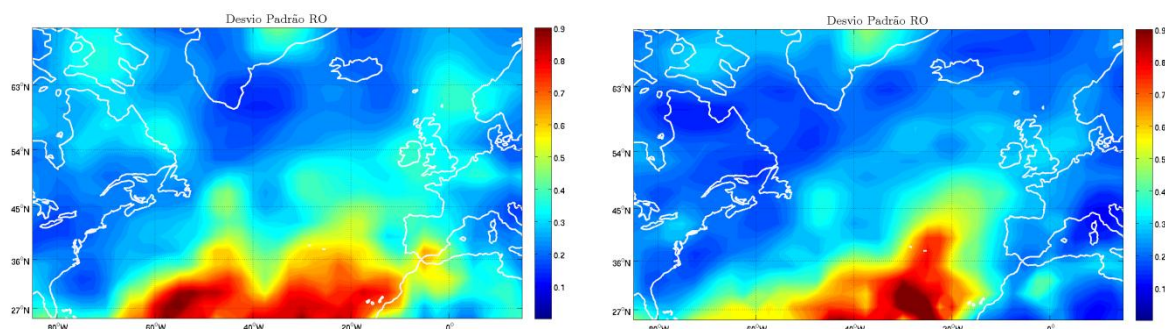


Fig.5-A – Desvio padrão do raio ($^{\circ}$ lat) no inverno (esquerda) e verão (direita). Período 1971 – 2000. Reanálises ERA40.

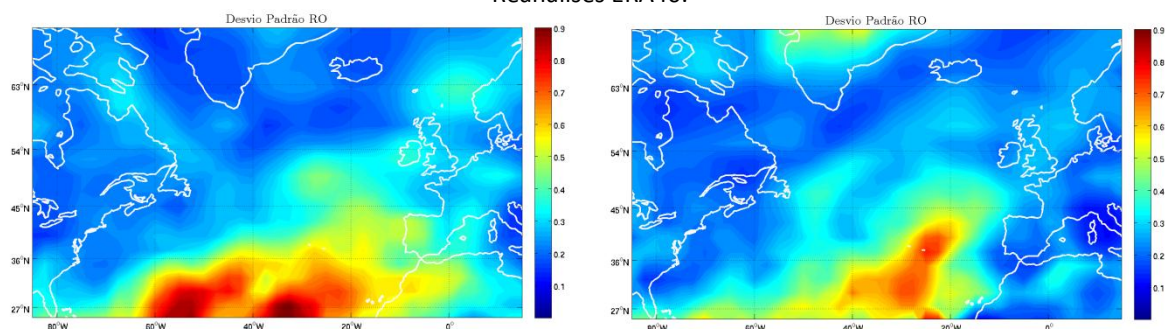


Fig.6-A – Desvio padrão do raio ($^{\circ}$ lat) no inverno (esquerda) e verão (direita). Período 1971 – 2000. Reanálises NCEP I.

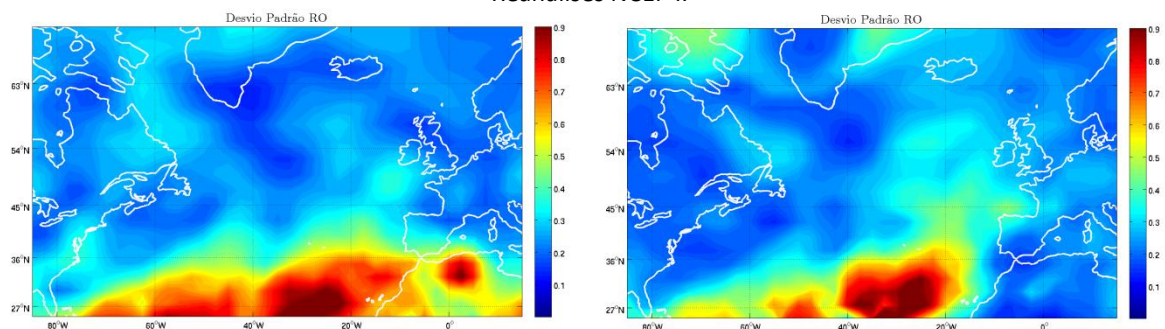


Fig.7-A – Desvio padrão do raio ($^{\circ}$ lat) no inverno (esquerda) e verão (direita). Período 1971 – 2000. Modelo ECHAM5.

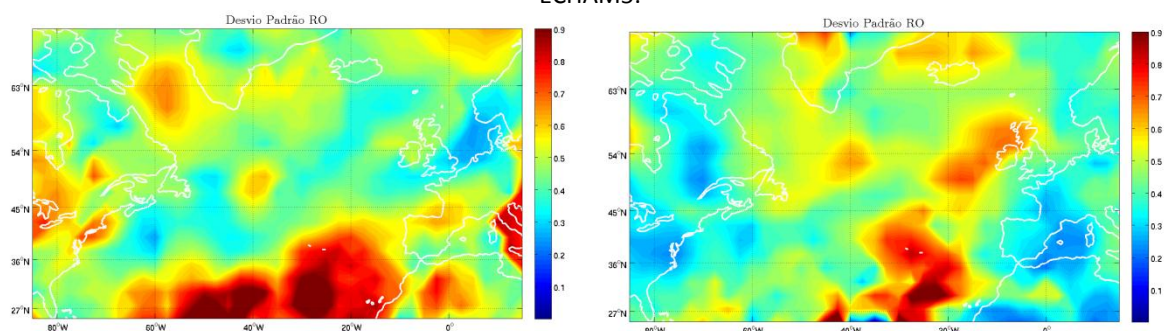


Fig.8-A – Desvio padrão do raio ($^{\circ}$ lat) no inverno (esquerda) e verão (direita). Período 1971 – 2000. Modelo CCSM3.

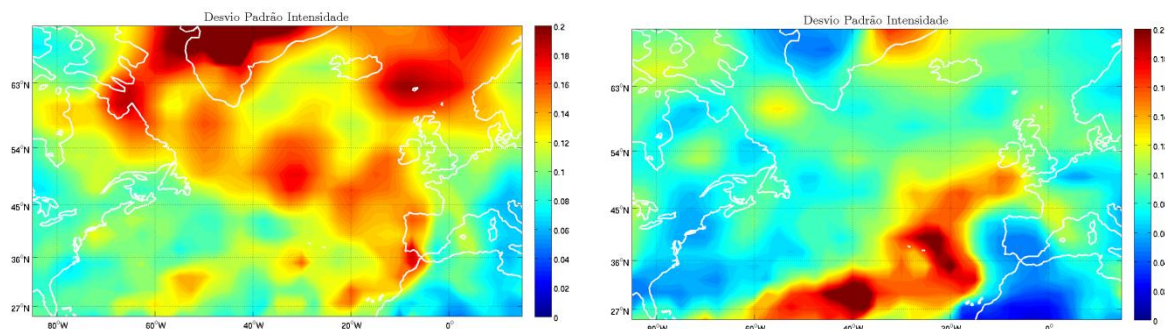


Fig.9-A – Desvio padrão da intensidade ($\text{hPa } (^\circ \text{ lat})^{-2}$) no inverno (esquerda) e verão (direita). Período 1971 – 2000. Reanálises ERA40.

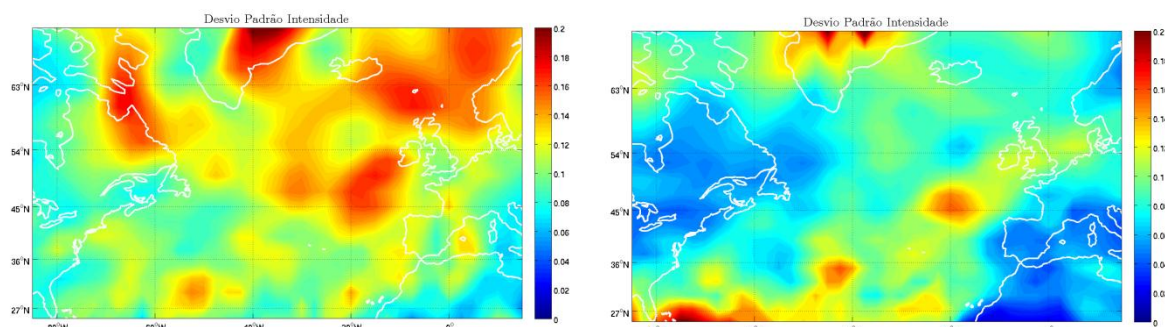


Fig.10-A – Desvio padrão da intensidade ($\text{hPa } (^\circ \text{ lat})^{-2}$) no inverno (esquerda) e verão (direita). Período 1971 – 2000. Reanálises NCEP I.

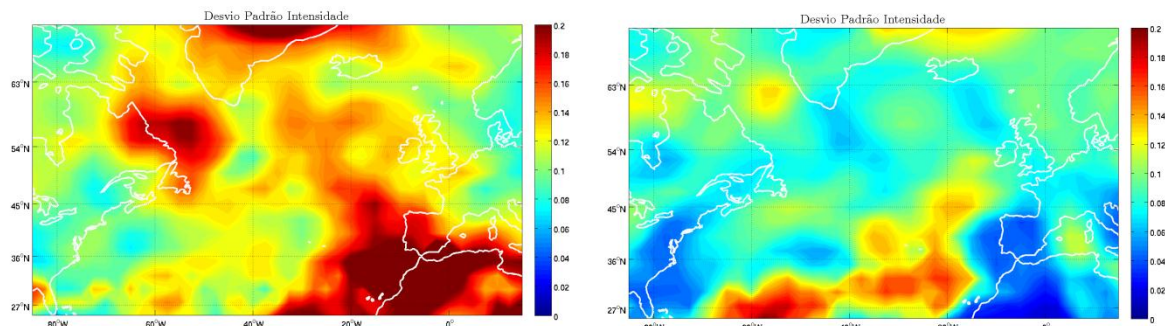


Fig.11-A – Desvio padrão da intensidade ($\text{hPa } (^\circ \text{ lat})^{-2}$) no inverno (esquerda) e verão (direita). Período 1971 – 2000. Reanálises Modelo ECHAM5.

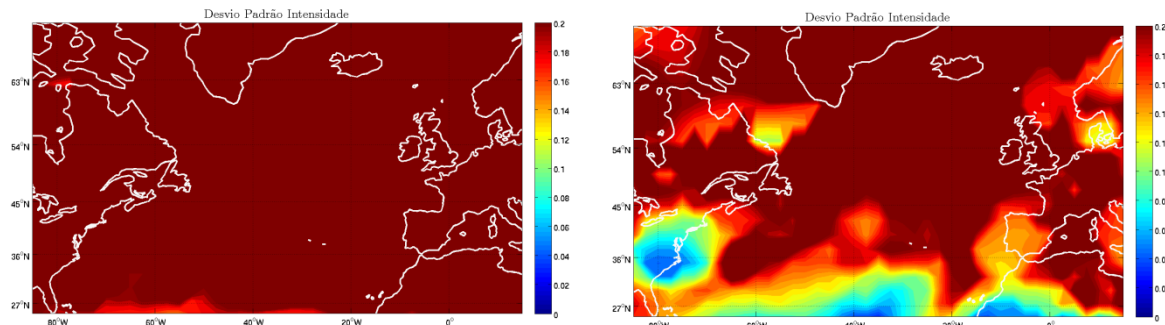


Fig.12-A – Desvio padrão da intensidade ($\text{hPa } (^\circ \text{ lat})^{-2}$) no inverno (esquerda) e verão (direita). Período 1971 – 2000. Modelo CCSM3.

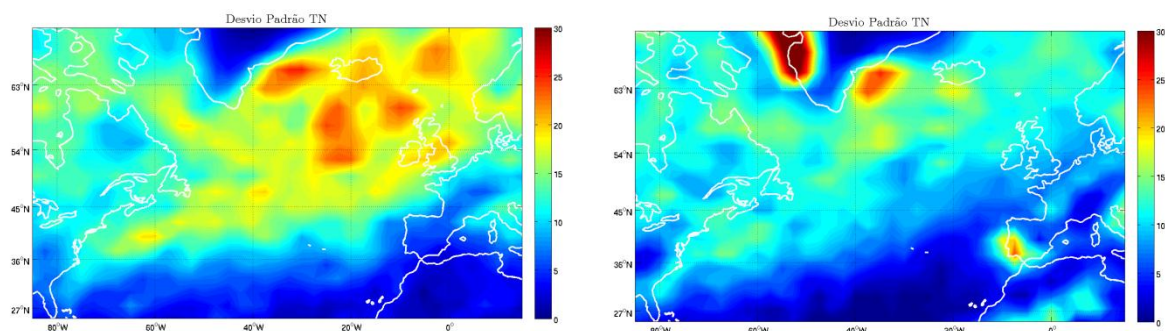


Fig.13-A – Desvio padrão do número total de tempestades no inverno (esquerda) e verão (direita). Período 2071 – 2100. Modelo ECHAM5.

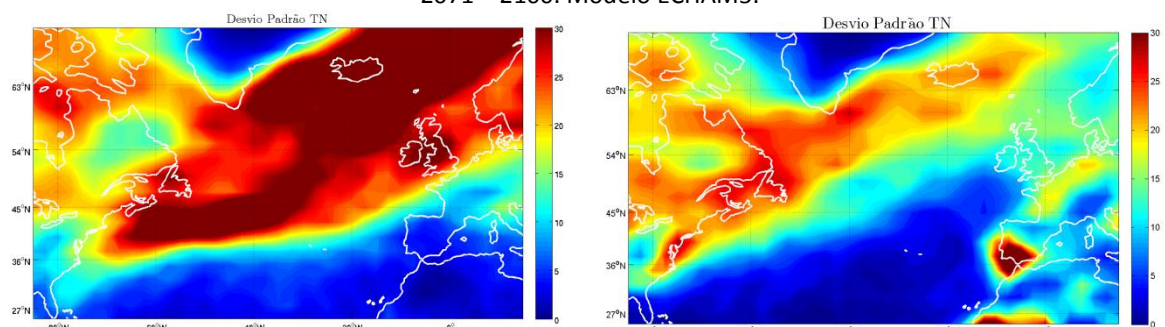


Fig.14-A – Desvio padrão do número total de tempestades no inverno (esquerda) e verão (direita). Período 2071 – 2100. Modelo CCM3.

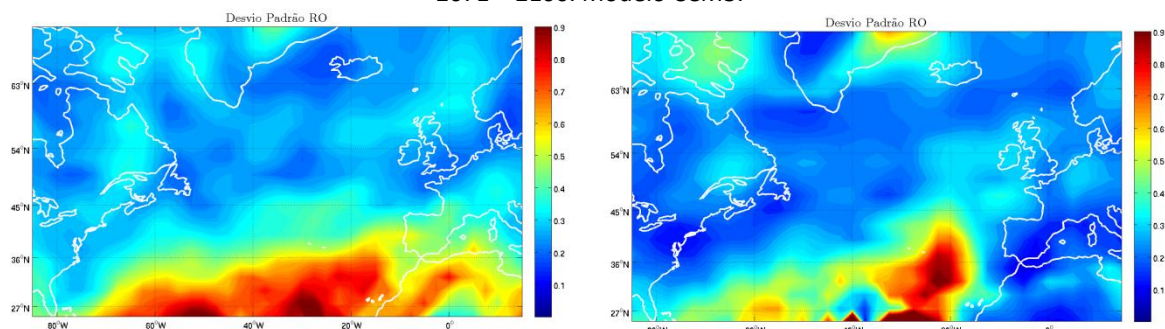


Fig.15-A – Desvio padrão do raio ($^{\circ}$ lat) no inverno (esquerda) e verão (direita). Período 2071 – 2100. Modelo ECHAM5.

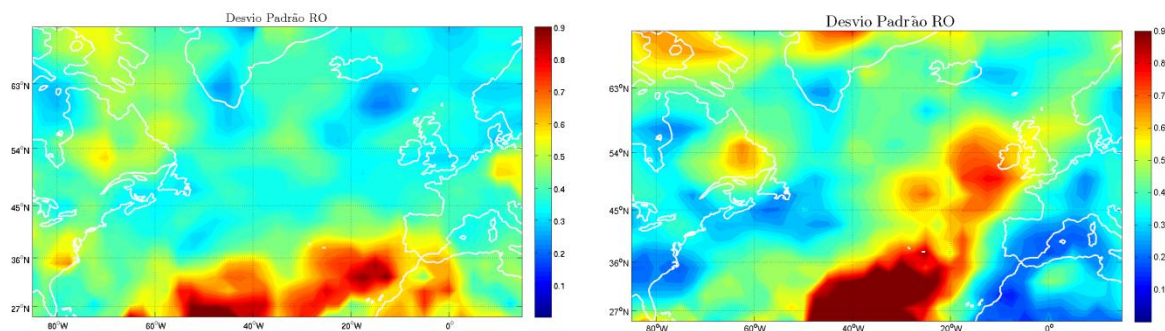


Fig.16-A – Desvio padrão do raio ($^{\circ}$ lat) no inverno (esquerda) e verão (direita). Período 2071 – 2100. Modelo CCSM3.

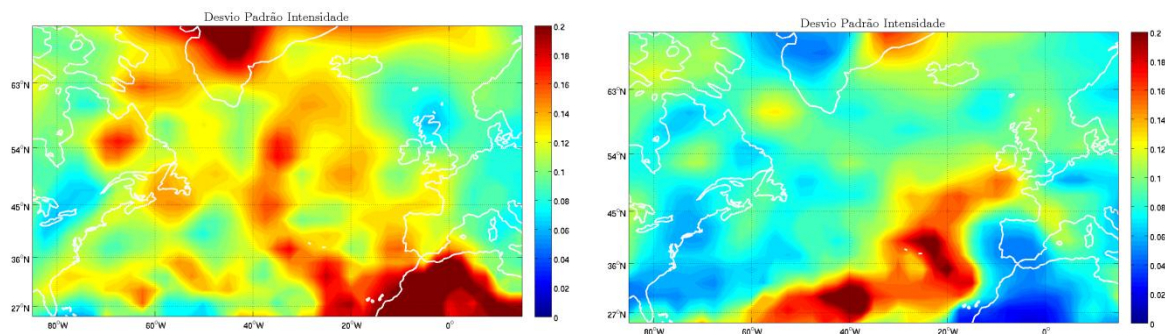


Fig.17-A – Desvio padrão da intensidade ($\text{hPa } ^\circ\text{lat}^{-2}$) no inverno (esquerda) e verão (direita). Período 2071 – 2100. Reanálises Modelo ECHAM5.

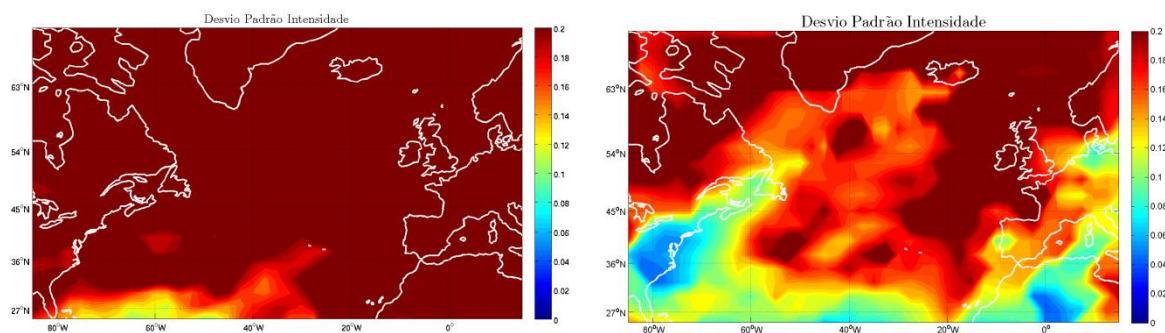


Fig.18-A – Desvio padrão da intensidade ($\text{hPa } ^\circ\text{lat}^{-2}$) no inverno (esquerda) e verão (direita). Período 2071 – 2100. Reanálises Modelo CCSM3.

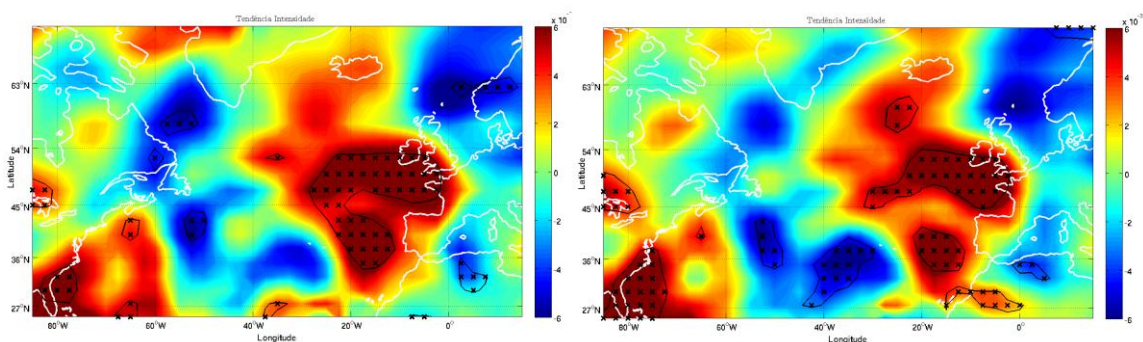


Fig.19-A – Tendência da intensidade ($\text{hPa } ^\circ\text{lat}^{-2} \text{ano}^{-1}$) no Outono durante o período 1971 -2000. Reanálises ERA40 (esquerda) e Reanálises NCEP I (direita). Contornos e zonas assinaladas com X indicam significância estatística ao nível de confiança de 95%.